

RESUMEN

El presente proyecto versa sobre el diseño de un sistema constructivo de cubierta curvada autoportante de chapa de acero conformada en frío.

Los perfiles curvados de chapa se obtienen en fábrica, se transportan hasta obra y se colocan directamente sobre las vigas principales de una estructura, actuando estos de cubierta de la edificación.

Este tipo de cubierta presenta una gran ventaja puesto que al ser autoportante no necesita viguetas ni vigas intermedias. Es la propia chapa metálica curvada la que soporta las cargas y las transmite a los apoyos sin necesidad de estructura intermedia. Además la ejecución material de este tipo de cubiertas es sencilla y rápida.

El presente proyecto estudia este tipo de cubierta para cubrir longitudes de 9 a 14 m. Así mismo se tiene en cuenta una variabilidad de la flecha de los arcos descritos por el perfil de chapa curvado, entre 1.000 mm y 3.000 mm.

El objetivo principal de este proyecto es la realización de unas tablas de capacidades, de un perfil de chapa determinado, para el diseño de estas cubiertas autoportantes. Las tablas se realizan a partir de datos obtenidos mediante simulaciones iterativas por el método de elementos finitos, utilizando el programa ANSYS (se han utilizado las versiones de ANSYS 14.0 y 15.0).

Para ello, una vez establecidos los modelos a simular, se procede a realizar diversos estudios para decidir las hipótesis de carga a considerar, incluyendo combinaciones de éstas. Una vez decididas las hipótesis y ajustadas a cada caso, se ejecutan todas las simulaciones que hacen falta mediante el programa ANSYS para obtener los datos necesarios para posteriormente realizar las tablas objeto de este proyecto.

Como objetivo secundario se procede a realizar un sistema de comprobación de resistencia e inestabilidad de los apoyos o pilares donde la cubierta descansa, para verificar si cumplen con la normativa actual. A tal efecto, para facilitar la tarea de realizar estos cálculos repetitivos para cada una de las cubiertas diseñadas, en un futuro, se han realizado unas hojas de cálculo de comprobación de dichos soportes.

Estas hojas de cálculo están realizadas para que mediante programación, cálculos y relaciones internas, realicen las comprobaciones oportunas automáticamente.

Por último en este proyecto también se incluye un ejemplo para explicar el uso posterior tanto de las tablas para el diseño como del de las hojas de cálculo para la verificación de soportes.

SUMARIO

RESUMEN	I
SUMARIO	III
ANEJOS INCLUIDOS EN ESTE PROYECTO	VI
ÍNDICE FIGURAS	VIII
ÍNDICE TABLAS	X
GLOSARIO	XIII
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 ORIGEN DEL PROYECTO	1
1.2 REQUERIMIENTOS PREVIOS.....	1
1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO	1
1.4 ALCANCE DEL PROYECTO	2
1.5 ESTRUCTURA DEL PROYECTO.....	2
1.5.1 Memoria.....	3
1.5.2 Anejos.....	3
2 SITUACIÓN ACTUAL DE LAS CUBIERTAS CURVADAS AUTOPORTANTES	5
2.1 CHAPA DE ACERO CONFORMADA EN FRÍO	5
2.2 CUBIERTA CURVADA AUTOPORTANTE	5
2.3 TIPOS DE CUBIERTA CURVADA AUTOPORTANTE	6
2.3.1 Cubierta simple	6
2.3.2 Cubierta sándwich	6
2.4 APLICACIONES DE CUBIERTA CURVA AUTOPORTANTE	7
2.5 VENTAJAS DE ESTAS CUBIERTAS	9
2.6 PROCESO DE FABRICACIÓN DE UNA CHAPA DE ACERO CONFORMADA EN FRÍO	9
2.7 CUBIERTA CURVADA AUTOPORTANTE DE CHAPA DE ACERO CONFORMADA EN FRÍO EN EL MERCADO	12
2.7.1 Chapa grecada de acero conformada en frío.....	12
2.7.2 Chapa de acero conformada en frío con una sola onda.	13

3	BASES DE DISEÑO ESTRUCTURAL	15
3.1	DESCRIPCIÓN DEL MODELO	15
3.2	GEOMETRÍA DEL PERFIL H68 (CHAPA CURVADA)	16
3.3	DESCRIPCIÓN Y GEOMETRÍA DE LOS CABLES	19
3.3.1	Cables	19
3.3.2	Elección del cable	19
3.4	CONDICIONES DE ENLACE	21
3.5	FLECHAS VERTICALES ADMISIBLES	21
3.6	COEFICIENTES DE SEGURIDAD DE LAS ACCIONES CONSIDERADAS	22
3.7	HIPÓTESIS DE CARGA CONSIDERADAS	23
3.7.1	Coeficientes μ_1 , μ_2 y μ_3 para las hipótesis 2 y 6	27
3.7.2	Estudio de las hipótesis de viento no uniforme, viento lateral	27
3.7.3	COMBINACIÓN 1 y COMBINACIÓN 2 de hipótesis	33
3.7.4	Estudio de la COMBINACIÓN 1	34
3.7.5	Estudio de la COMBINACIÓN 2	36
4	ANÁLISIS Y DIMENSIONADO DE LA CUBIERTA	37
4.1	MÉTODO DE ANÁLISIS DEL ARCO	37
4.1.1	Método de Newton-Raphson completo	40
4.2	COMPROBACIONES EFECTUADAS	41
4.2.1	Verificación de los perfiles curvados	41
4.2.2	Verificación de los tirantes de cable	43
4.2.3	Verificación de la flecha	43
4.2.4	Datos calculados cumpliendo las verificaciones	44
4.3	ENSAYOS EXPERIMENTALES	44
4.4	RIGIDECES DE LOS SOPORTES DE LA CUBIERTA (CASO SUCCIÓN)	44
5	MACROS ANSYS	47
5.1	DESCRIPCIÓN DE MACRO DE ANSYS	47
5.2	DISEÑO Y ESTRUCTURA DE LAS MACROS UTILIZADAS	49
5.2.1	Diseño de la macro	50
5.3	MACRO PRINCIPAL: ESTRUCTURA Y ÓRDENES UTILIZADAS	50
5.4	ARCHIVOS O FICHEROS DE LAS MACRO UTILIZADAS	51
5.5	ELEMENTOS DE ANSYS UTILIZADOS	52
5.6	CÁLCULO CON ANSYS	52

6	GENERACIÓN DE TABLAS PARA EL DISEÑO	54
6.1	ARCHIVOS DE SALIDA DE ANSYS.....	54
6.2	DATOS DE LOS FICHEROS DE SALIDA.	55
6.3	FORMATO DE LAS TABLAS DE CAPACIDAD.....	56
6.4	TABLAS DE CAPACIDAD PARA LA HIPÓTESIS DE PRESIÓN UNIFORME.....	58
6.5	TABLAS DE CAPACIDAD PARA LA HIPÓTESIS DE SUCCIÓN UNIFORME K=250.....	58
6.6	TABLAS DE CAPACIDAD PARA LA HIPÓTESIS DE SUCCIÓN NO UNIFORME K=250 (CASO MARQUESINA).....	58
7	COMPROBACIÓN SOPORTES	69
7.1	SISTEMA DE VERIFICACIÓN DE LOS SOPORTES.....	69
7.2	PESTAÑA PRINCIPAL DE SUCCIÓN	70
7.2.1	Datos a rellenar.....	70
7.2.2	Otros datos	73
7.2.3	Comprobaciones a realizar	73
7.2.4	Cálculos	73
7.2.5	Comprobaciones realizadas.....	73
7.2.6	Resumen comprobación.....	73
7.3	PESTAÑA PRINCIPAL DE PRESIÓN	73
7.3.1	Datos a rellenar.....	74
7.4	PESTAÑAS RIGIDECES PILARES_SUCCIÓN, Y RIGIDECES PILARES_PRESIÓN	74
7.5	DATOS PERFILES.....	75
7.6	TABLAS EAE.....	75
7.7	LISTAS DESPLEGABLES.....	75
7.8	PÁGINAS DE LAS COMPROBACIONES.....	75
8	EJEMPLO DE APLICACIÓN: CUBIERTA PISTA PÁDEL	79
8.1	DESCRIPCIÓN DEL EJEMPLO DE APLICACIÓN.....	79
8.2	GEOMETRÍA DE UN CAMPO O PISTA DE PÁDEL	80
8.3	DATOS A TENER EN CUENTA PARA LA COLOCACIÓN DE LA CUBIERTA.....	82
8.4	CUBIERTAS A INSTALAR	83
8.5	ACCIONES A CONSIDERAR	84
8.6	VERIFICACIÓN DE LA CUBIERTA	86

8.6.1	DATOS DE LA CUBIERTA	86
8.6.2	HIPÓTESIS DE CARGA	86
8.6.3	VERIFICACIÓN DE LAS TABLAS CAPACIDAD DE CARGA PARA CADA HIPÓTESIS	90
8.6.4	VERIFICACIÓN SOPORTES.....	93
9	IMPACTO AMBIENTAL	101
10	PRESUPUESTO	105
	CONCLUSIONES	107
	AGRADECIMIENTOS	109
	BIBLIOGRAFÍA	111
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
	BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA	112

ANEJOS INCLUIDOS EN ESTE PROYECTO

ANEJO A: Descripción del modelo y toma de decisiones

Se detallan las diferentes partes del modelo, se realiza un estudio de los cables y se explican las decisiones tomadas para realizar las simulaciones de carga de la cubierta objeto de este proyecto.

ANEJO B: Hojas de cálculo

Se describen las hojas de cálculo realizadas y se especifica y detalla cada una de las zonas que poseen

ANEJO C: Método elementos finitos y ANSYS

Se explica brevemente el método de los elementos finitos. Se especifican los datos de los elementos de ANSYS utilizados en las simulaciones. Se detallan y se explican cada una de las líneas de una Macro.

ANEJO D: Macros Ansys

Se presentan diferentes Macros utilizadas en el presente proyecto.

ANEJO E: Tablas de capacidad de carga del perfil curvado H68

Se presentan todas las tablas de capacidad de carga realizadas.

ANEJO F: Ejemplo de aplicación CUBIERTA PISTA DE PÁDEL

Se incluye un ejemplo para explicar el uso posterior tanto de las tablas de capacidad de carga para el diseño de una cubierta, con el sistema constructivo estudiado en el presente proyecto, como el uso de la hoja de cálculo para la verificación del cumplimiento de los soportes de la cubierta con la normativa actual.

En el ejemplo se explica paso a paso el proceso a seguir, desde como calcular las acciones que se han de considerar para el diseño de la cubierta, hasta la comprobación de la cubierta y sus soportes, pasando por los datos a tener en cuenta de la cubierta, que tablas de capacidades usar de todas las existentes y cuáles son los datos necesarios a extraer de las citadas tablas.

ANEJO G: Catalogo de cables

Se presentan los catálogos que se han utilizado y de los que se han extraído datos para la realización de este proyecto.

ANEJO H: Perfiles de chapa curvada en el mercado

Se muestran perfiles de chapa curvada de diferentes empresas.

ANEJO I: Planos

Se adjuntan los planos realizados para este proyecto.

ÍNDICE FIGURAS

Fig. 2.1	Cubierta curvada autoportante simple.....	6
Fig. 2.2	Cubierta curvada autoportante sándwich	6
Fig. 2.3	Cubierta curva autoportante como solución para gradas fútbol.....	7
Fig. 2.4	Cubierta Autoportante como solución a cubierta de edificio	8
Fig. 2.5	Cubierta Autoportante como solución a cubierta de nave industrial	8
Fig. 2.6	Esquema proceso de fabricación (destacando en amarillo la chapa para bobinado)	9
Fig. 2.7	Formado con rodillos de un elemento con sección en U	10
Fig. 2.8	Bobinas de chapa.....	10
Fig. 2.9	Máquina perfiladora.....	11
Fig. 2.10	Máquina de estampación	11
Fig. 2.11	Detalle de la matriz.....	11
Fig. 2.12	Sistema y tabla de los perfiles grecados de la empresa Hoesch.....	12
Fig. 3.1	Esquema de la cubierta con variabilidades de longitud y flecha.....	15
Fig. 3.2	Sección transversal del perfil de chapa estudiado H68.	17
Fig. 3.3	Parámetros que definen la geometría del perfil (casos de presión).....	18
Fig. 3.4	Parámetros que definen la geometría del perfil (casos de succión)	18
Fig. 3.5	Designación de las partes de un cable	19
Fig. 3.6	Cable rígido, flexible y semirígido	19
Fig. 3.7	Dirección viento frontal y viento lateral	24
Fig. 3.8	Hipótesis de carga 1, 2 y 3	25
Fig. 3.9	Hipótesis de carga 4, 5 y 6	26
Fig. 3.10	Esquema de carga de los casos 1a, 1b, 2a y 2b	28
Fig. 3.11	Forma del primer modo pandeo del arco.....	28
Fig. 3.12	Forma del segundo modo pandeo del arco	28
Fig. 4.1	Modelo 1 en ANSYS (Presión): numeración de elementos.	38
Fig. 4.2	Modelo 2 en ANSYS (Succión): numeración de elementos.	38
Fig. 4.3	Primer modo de inestabilidad o pandeo.	39
Fig. 4.4	Imperfecciones iniciales e_0 según el primer modo de inestabilidad.	39
Fig. 4.5	Magnitud y forma de la imperfección a considerar en arcos [7]......	39
Fig. 4.6	Método Newton-Raphson completo	40
Fig. 4.7	Esquema de la estructura. Altura y separación de pilares.....	45
Fig. 5.1	Parte inicial de la Macro principal de Presión Uniforme con lenguaje APDL.....	48

Fig. 5.2	Ficheros de una Macro	51
Fig. 7.1	Leyenda de las hojas SUCCIÓN y PRESIÓN.....	70
Fig. 7.2	Esquema de la estructura	71
Fig. 7.3	Diferentes tipos de casillas	72
Fig. 7.4	Perfil recomendado, K_{min} y K_{perfil} comprobación	72
Fig. 7.5	Perfil recomendado, y lista desplegable para elegir otro perfil si se desea	72
Fig. 7.6	Hoja de cálculo de comprobación de soporte, SUCCIÓN (Página 1)	76
Fig. 7.7	Hoja de cálculo de comprobación de soporte, SUCCIÓN (Página 2)	77
Fig. 7.8	Hoja de cálculo de comprobación de soporte, SUCCIÓN (Página 3)	78
Fig. 8.1	Vista aérea de las instalaciones de PADELING.....	79
Fig. 8.2	Planta del campo o pista de juego.	80
Fig. 8.3	Alzado lateral, pista de pádel (variante 1).	81
Fig. 8.4	Alzado lateral, pista de pádel (variante 2).	81
Fig. 8.5	Alzado fondo.	81
Fig. 8.6	Vista aérea de la pista a cubrir	82
Fig. 8.7	Pista de pádel con iluminación artificial mediante proyectores.....	83
Fig. 8.8	Esquema de las dimensiones de la estructura de cubierta de la pista de pádel.	84
Fig. 8.9	Hipótesis de carga 1, 2 y 3.....	87
Fig. 8.10	hoja SUCCIÓN, comprobación soportes PÁDEL (página 1).....	95
Fig. 8.11	hoja SUCCIÓN, comprobación soportes PÁDEL (página 2).....	96
Fig. 8.12	hoja PRESIÓN, comprobación soportes PÁDEL (página 1)	99
Fig. 8.13	hoja PRESIÓN, comprobación soportes PÁDEL (página 2)	100
Fig. 9.1	Ciclo de vida de un producto de acero.....	102
Fig. 9.2	Ciclo de vida del acero.....	103

ÍNDICE TABLAS

Tabla 2.1	Sistema y tabla de los perfiles nono onda de la empresa Hoesch.....	13
Tabla 2.2	Tabla de longitudes para perfiles mono onda de la marca Blocotelha....	13
Tabla 3.1	Numeración de los análisis ejecutados especificando Longitud- Flecha.....	16
Tabla 3.2	Propiedades brutas del perfil H68 sin curvar.	17
Tabla 3.3	Propiedades eficaces de la sección del perfil H68 curvado.....	17
Tabla 3.4	TIRANTE DE CABLE de longitud variable, de 9 hasta 12 m.....	20
Tabla 3.5	TIRANTE DE CABLE de longitud variable, de 12 hasta 14 m.....	20
Tabla 3.6	Casos de la hipótesis 6 de viento no uniforme	29
Tabla 3.7	Permutaciones estudiadas de la hipótesis 6 de viento no uniforme	30
Tabla 3.8	Resultado combinaciones caso 3a.....	31
Tabla 3.9	Combinaciones de hipótesis estudiadas	33
Tabla 3.10	COMBINACIÓN 1: situación estudiada	34
Tabla 3.11	COMBINACIÓN 1: situaciones comparadas	35
Tabla 3.12	COMBINACIÓN 2: situaciones estudiada	36
Tabla 4.1	Tabla 35.3.a de la EAE [5] Valores de $N_{Rk}=f_y A_i$, $M_{i,Rk}=f_y W_i$ y $\Delta M_{i,Ed}$	42
Tabla 4.2	K de soportes de perfiles HEB para separaciones entre 2 y 7 m.....	46
Tabla 6.1	Fragmento de fichero de resultados	56
Tabla 6.2	Unidades de las variables de resultados de Ansys y unidades deseadas.....	57
Tabla 8.1	Tabla Resumen de Acciones a considerar.	85
Tabla 8.2	Cargas e Hipótesis	89
Tabla 8.3	Carga gravitatoria uniforme $q_{Qmáx}$ ELU.....	91
Tabla 8.4	Carga gravitatoria uniforme $q_{Qmáx}$ ELS.....	91
Tabla 8.5	Carga gravitatoria no uniforme $q_{Qmáx}$ ELU.....	92
Tabla 8.6	Carga gravitatoria uniforme $q_{Qmáx}$ ELU.....	92
Tabla 8.7	Valores a introducir en comprobación soportes actuando succión.	93
Tabla 8.8	Valores de carga, reacción y desplazamiento de la hipótesis 5, para cubierta pista de Pádel.	94
Tabla 8.9	Valores a introducir en comprobación soportes actuando presión.	97
Tabla 8.10	Valores de carga, y desplazamiento de la hipótesis 1, para cubierta pista de Pádel.....	98
Tabla 10.1	Presupuesto el proyecto.....	105

GLOSARIO

$\Delta M_{y,Ed}, \Delta M_{z,Ed}$	Momentos adicionales debidos al desplazamiento del centro de gravedad del área eficaz A_{eff} con respecto al centro de gravedad de la sección transversal bruta
χ_{LT}	Coeficiente de reducción para pandeo lateral
χ_y, χ_z	Coeficientes de reducción para pandeo por flexión
$\delta_{soporte}$	Desplazamiento del soporte
$\delta_{soportes}$	Desplazamiento suma de los 2 soportes
δ_{max}	Desplazamiento máximo
ϕ_{cable}	Diámetro del cable
γ_F	Coeficiente de seguridad para una fuerza puntual
γ_G	Coeficiente parcial de seguridad para las acciones permanentes
γ_Q	Coeficiente parcial de seguridad para las acciones variables
γ_M	Coeficiente de seguridad del material
γ_{M0}	Coeficiente de seguridad de resistencia de las secciones transversales para estados límite últimos
γ_{M1}	Coeficiente de seguridad de resistencia de elementos estructurales frente a inestabilidad para estados límite últimos
$\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_i$	Coeficientes de las cargas variable en los casos de carga no uniforme
ν	Coeficiente de Poisson
A	Área del perfil
A_{cable}	Área del cable o sección metálica del cable
A_{eff}	Área eficaz del perfil

despl	Desplazamiento en el extremo izquierdo del arco
despl2	Desplazamiento en el extremo derecho del arco
E	Módulo de elasticidad longitudinal o módulo de Young
e_0	Valor de la amplitud de imperfección inicial a introducir
E_{cable}	Módulo de elasticidad longitudinal o módulo de Young del cable
F	Carga puntual variable
f	Flecha del arco que describe el perfil de chapa de acero conformada en frío.
F_{adm}	Flecha máxima admisible (deformación)
$F_{\text{Horizontal}}$	Fuerza horizontal
Flecha	Flecha máxima de la chapa
f_u	Resistencia última a tracción del acero.
f_y	Límite elástico del acero
G	Módulo de elasticidad transversal
H	Altura del soporte
I	Inercia del perfil
I_{eff}	Inercia eficaz del perfil
k	Rigidez columna
K	Rigidez según la separación entre soportes
K_{min}	Rigidez horizontal mínima necesaria de los soportes
$K_{\text{perfil comprobación}}$	Valor de la rigidez del perfil que se hace la comprobación
$k_{yy}, k_{yz}, k_{zy}, k_{zz}$	Coeficientes de interacción
L	Longitud del arco que describe la chapa
L	Longitud o cuerda del arco que describe la chapa de acero conformada en frío

$M_{cz,Rd}$	es el momento resistente a flexión, calculado teniendo en cuenta el módulo resistente eficaz
$M_{z,Ed}$	es el momento flector
$N_{1,ul}$	Esfuerzo normal en el extremo derecho del arco
N_c	es la carga calculada del cable por metro lineal de chapa
N_c	Esfuerzo calculado del cable por metro lineal de chapa
$N_{c,Rd}$	es el esfuerzo normal resistente a compresión, calculado teniendo en cuenta el área eficaz de la sección
N_{cels}	Carga calculada del cable por metro lineal de chapa en el estado límite de servicio
N_{Ed}	es el esfuerzo normal obtenido en los análisis
$M_{y,Ed}, M_{z,Ed}$	Valores de cálculo de los momentos flectores máximos a lo largo del elemento alrededor de los ejes y-y y z-z respectivamente
N_u	Carga de rotura del tirante de cable
N_{ul}	Esfuerzo normal en el extremo izquierdo del arco
PP	Peso propio del perfil
$q_{adm\ suc}$	Carga admisible de succión (sin mayorar)
$q_{adm, pres}$	Carga admisible de presión (sin mayorar)
q_{els}	Carga de servicio
q_{els}	Carga en el estado límite servicio
q_G	Acción permanente
q_Q	Acción distribuida variable
q_{ul}	Carga en el estado límite último, carga última
r	Radio del arco que describe la chapa de acero conformada en frío.
$R_{x_{ul}}$	Reacción horizontal en el apoyo izquierdo
$R_{x1_{ul}}$	Reacción horizontal en el apoyo derecho

s	Separación entre soportes
t	Espesor del perfil
W	Módulo resistente del perfil
$W_{\text{eff-}}$	Módulo resistente eficaz negativo de la sección del perfil
$W_{\text{eff+}}$	Módulo resistente eficaz positivo de la sección del perfil

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ORIGEN DEL PROYECTO

Desde el año 2004 el Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria, de la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (UPC) está estudiando e investigando sobre diferentes temas relacionados con las cubiertas autoportantes curvadas. Actualmente trabaja con dos empresas diferentes dentro del tema que abarca este proyecto.

Una de las empresas que fabrica y comercializa perfiles curvos de chapa de acero conformado en frío, a la que llamaremos ChapaMet, ha solicitado un estudio de uno de sus perfiles al Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria, de la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (UPC) y este ha sido el punto de partida de este proyecto.

1.2 REQUERIMIENTOS PREVIOS

Conocer el funcionamiento del programa ANSYS y conocer su lenguaje APDL (Lenguaje Paramétrico de diseño de ANSYS) para poder escribir y modificar ficheros que realicen simulaciones con cálculos iterativos.

También se han de poseer conocimientos fundamentales de resistencia de materiales y estructuras.

1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo de este proyecto es el estudio de un sistema constructivo de una cubierta curvada autoportante de chapa de acero conformada en frío, definir de su procedimiento de diseño y realizar las tablas de capacidades de carga. Mediante la creación de unos modelos de la cubierta con elementos finitos y mediante unas simulaciones de estos modelos de la cubierta con el programa de elementos finitos llamado ANSYS, se pretenden obtener resultados de los casos a estudiar. Estos resultados serán los utilizados para realizar las tablas de capacidades para el diseño, con el perfil de chapa concretamente estudiado.

Además de las tablas de capacidad para diferentes hipótesis de carga, también se quiere realizar un sistema de verificación según normativa, de los soportes donde apoya la cubierta, en el caso que los apoyos sean perfiles laminados metálicos.

1.4 ALCANCE DEL PROYECTO

El alcance del presente proyecto abarca: el estudio y posterior elección del cable a colocar en uno de los dos modelos estudiados, estudios sobre las hipótesis de carga a considerar, la realización de simulaciones de la cubierta mediante elementos finitos, el diseño y construcción de las tablas de capacidades, así como el estudio y la creación de un sistema de verificación de los perfiles de soporte de la cubierta.

Para ello, se profundizará sobre el tema de los cables metálicos consultando catálogos de diferentes casas comerciales y se contactará con dichas casas. A partir de aquí se elegirá el cable más idóneo para usarlo en la cubierta.

Se estudiarán y establecerán las hipótesis a considerar en este tipo de cubiertas observando las normativas. En el caso que actúe viento lateral se realizarán estudios de casos concretos. Y se determinarán los casos más desfavorables. También se estudiarán algunos casos de combinación de hipótesis.

Se establecerán los modelos a simular. Se procederá a la ejecución de las simulaciones iterativas mediante el programa de elementos finitos ANSYS, ajustando los parámetros necesarios para cada hipótesis a estudiar.

Partiendo de los datos obtenidos de las simulaciones se diseñarán y se elaborarán las tablas de capacidad objeto principal de este proyecto.

Para realizar el sistema de comprobación de resistencia e inestabilidad de los apoyos de la cubierta se llevará a cabo la creación de unas hojas de cálculo que verificarán automáticamente si cumplen con la normativa actual.

1.5 ESTRUCTURA DEL PROYECTO

El presente proyecto consta de una memoria y de 9 anejos. En la memoria se resume el trabajo llevado a cabo en el proyecto y puede ser leída con independencia de los anejos. En los anejos se profundiza sobre algún tema, se presentan los planos realizados de este proyecto, o se incluyen algunas páginas de catálogos. En el punto que se ha creído oportuno, en el interior de la memoria, se indica en qué anejo se desarrolla el tema en más detalle, o se adjunta algún tipo de información.

Se ha pretendido también que cada uno de los anejos pueda ser leído de manera independiente de la memoria. Por ello en su interior aparece todo lo necesario para poder ser leídos y entendidos sin tener que recurrir a la memoria.

1.5.1 Memoria

La memoria de este proyecto está compuesta por 3 capítulos preliminares, 10 capítulos donde se desarrolla en sí la memoria, conclusiones, agradecimientos y bibliografía.

Los capítulos preliminares corresponden en primer lugar a un resumen de la memoria, luego al sumario, que incluye un índice de figuras y un índice de tablas y por último al glosario, donde se explican las abreviaturas utilizadas.

El cuerpo de la memoria se estructura en los siguientes 10 capítulos: Introducción, Situación actual de las cubiertas curvadas autoportantes, Bases de diseño estructural, Análisis y dimensionado de la cubierta, Macros ANSYS, Generación de tablas para el diseño, Comprobación soportes, Ejemplo de aplicación: cubierta pista pádel, Impacto ambiental y Presupuesto.

Después aparecen las conclusiones y por último se encuentran los agradecimientos y la bibliografía.

1.5.2 Anejos

A continuación se nombran los anejos incluidos en este proyecto.

ANEJO A: Descripción del modelo y toma de decisiones

ANEJO B: Hojas de cálculo

ANEJO C: Método elementos finitos y ANSYS

ANEJO D: Macros Ansys

ANEJO E: Tablas de capacidad de carga del perfil curvado H68

ANEJO F: Ejemplo de aplicación CUBIERTA PISTA DE PÁDEL

ANEJO G: Catalogo de cables

ANEJO H: Perfiles de chapa curvada en el mercado

ANEJO I: Planos

Una breve descripción de estos anejos la encontramos dentro del apartado *Anejos incluidos en este proyecto* del SUMARIO.

2 SITUACIÓN ACTUAL DE LAS CUBIERTAS CURVADAS AUTOPORTANTES

Como ya se ha comentado anteriormente el objetivo de este Proyecto final de carrera es el estudio de un sistema constructivo de una cubierta curvada autoportante de chapa de acero conformada en frío.

Antes de meternos de lleno en el cálculo y especificaciones del sistema constructivo en cuestión, en este capítulo vamos a introducir el concepto cubierta curvada autoportante. Para ello, a continuación se realiza una descripción breve de los conceptos, chapa de acero conformada en frío y cubierta curvada autoportante.

Después se especifican los tipos de cubierta curvada autoportante, sus aplicaciones y sus ventajas. Así mismo también se explican el proceso de fabricación de la chapa de acero conformada en frío, elemento principal para este tipo de cubiertas y los tipos de perfil de chapa que se pueden encontrar actualmente en el mercado para su construcción.

2.1 CHAPA DE ACERO CONFORMADA EN FRÍO

Se denomina chapa a una lámina delgada de metal. De las tres dimensiones de la chapa (anchura, longitud y espesor o grosor), predominan las dimensiones de anchura y longitud frente al grosor o espesor.

Una chapa de acero conformada en frío es una chapa de acero cuya conformación posterior viene dada por métodos en frío como pueden ser el laminado en frío, plegado o estampación.

2.2 CUBIERTA CURVADA AUTOPORTANTE

Una cubierta curvada autoportante es una solución constructiva en la que no existe estructura portante. Es la propia chapa metálica curvada la que soporta las cargas y las transmite a los apoyos sin necesidad de estructura intermedia. La chapa metálica curvada es un perfil metálico grecado o nervado que es curvado mediante embuticiones o rodillos. Dicha chapa curvada se fija a las vigas de apoyo mediante tornillos.

Las vigas de apoyo, así como las columnas o pilares pueden ser de acero, prefabricado de hormigón e incluso de hormigón in situ.

2.3 TIPOS DE CUBIERTA CURVADA AUTOPORTANTE

Una cubierta curvada autoportante puede ser simple o sándwich.

2.3.1 Cubierta simple

La cubierta curvada autoportante simple se compone de una única chapa curvada.
(Ver Fig. 2.1)

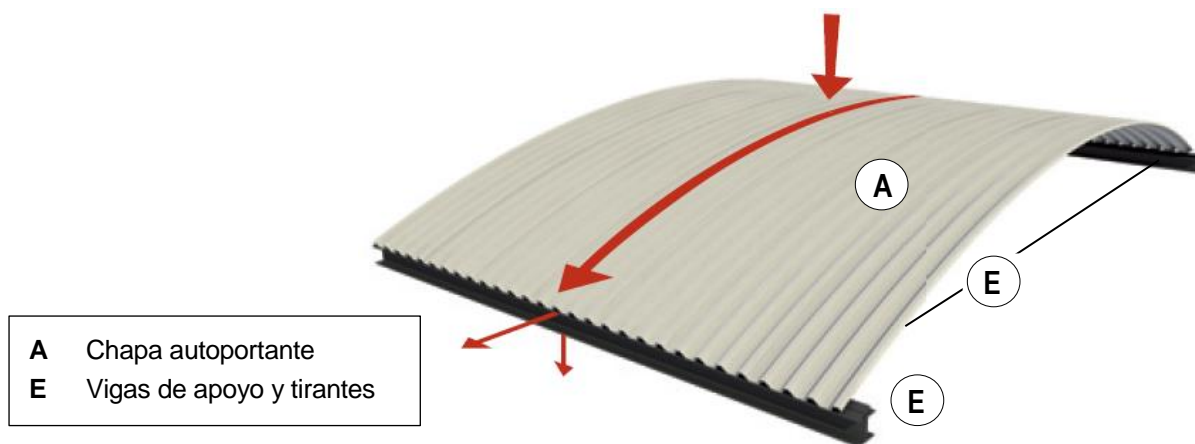


Fig. 2.1 Cubierta curvada autoportante simple

2.3.2 Cubierta sándwich

La cubierta curvada autoportante sándwich está compuesta por una chapa grecada inferior (que es el elemento resistente de la cubierta), una serie de omegas o perfiles separadores fijados a esta, un material continuo aislante (por ejemplo lana de roca o fibra de vidrio), una chapa grecada superior curvada (no resistente) y unas vigas de apoyo y tirantes (elementos estructurales que reciben las reacciones generadas por la cubierta curvada) (Ver Fig. 2.2)

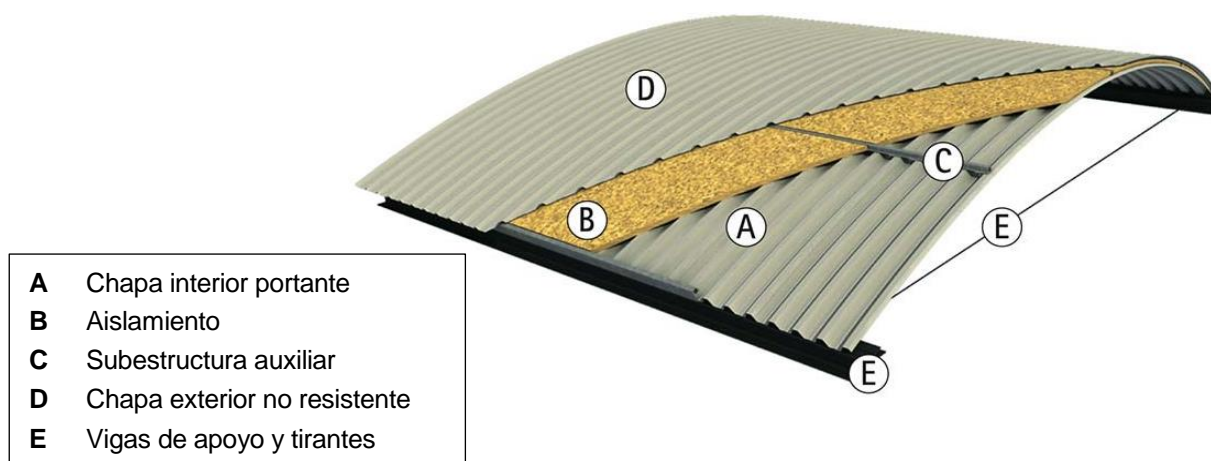


Fig. 2.2 Cubierta curvada autoportante sándwich

2.4 APLICACIONES DE CUBIERTA CURVA AUTOPORTANTE

La cubierta simple se puede colocar para evitar las inclemencias atmosféricas en instalaciones abiertas como pueden ser:

- Pistas Polideportivas (Pádel, Baloncesto, Fútbol Sala...)
- Estadios, Campos de fútbol
- Marquesinas

La cubierta sándwich se puede utilizar como cubierta de cualquier tipo de edificación. Al poseer aislante térmico se pueden conseguir características ambientales en el interior del edificio que cubre, similares a las que se obtendrían si se utilizara otro tipo de cubierta. Éste es el caso de:

- Naves Industriales
- Centros Comerciales
- Edificios en general

A continuación vemos algunos ejemplos dónde se ha utilizado la cubierta curva autoportante. (Ver Fig. 2.3, Fig. 2.4 y Fig. 2.5)



Fig. 2.3 Cubierta curva autoportante como solución para gradas fútbol



Fig. 2.4 Cubierta Autoportante como solución a cubierta de edificio



Fig. 2.5 Cubierta Autoportante como solución a cubierta de nave industrial

2.5 VENTAJAS DE ESTAS CUBIERTAS

Las cubiertas autoportantes al carecer de estructura auxiliar de apoyo no sólo se construyen mucho más rápidas, con el consecuente ahorro económico que ello comporta, sino que además se reducen las patologías en obra y el posterior mantenimiento de la cubierta.

Además las cubiertas curvadas autoportantes carecen de juntas de unión longitudinales así que se reduce el número de elementos mecánicos de fijación. En consecuencia se reducen los posibles puntos de entrada de agua y se reducen el número de remates y limahoyas. Nuevamente se presenta un ahorro en piezas, material, mano de obra y su posterior mantenimiento.

2.6 PROCESO DE FABRICACIÓN DE UNA CHAPA DE ACERO CONFORMADA EN FRÍO

El proceso de fabricación de cualquier elemento de chapa de acero conformada en frío empieza a partir de una bobina de acero. Esta bobina de chapa de acero se obtiene por laminación en caliente. Las características dimensionales de la chapa que conforma una bobina obtenida por laminación en caliente suele ser de 2-25mm de grosor y hasta 2.250mm de ancho. Posteriormente mediante un proceso de laminado en frío se puede reducir el grosor del material. En la figura siguiente, Fig. 2.6, se marca la rama de obtención de chapa que se bobinará.

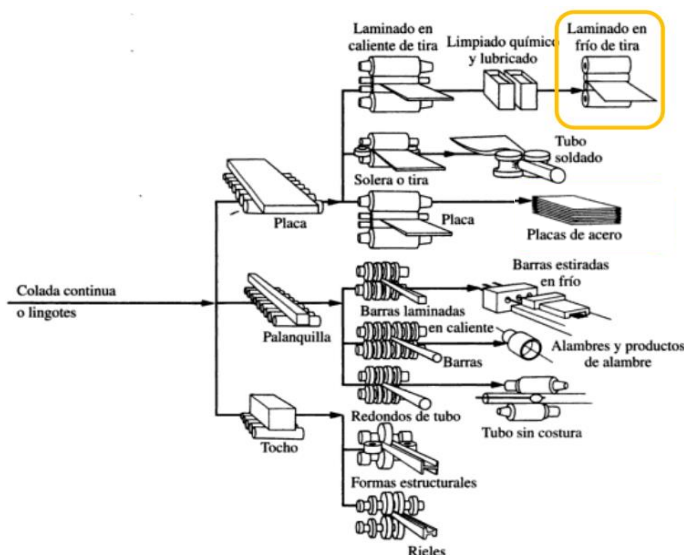


Fig. 2.6 Esquema proceso de fabricación (destacando en amarillo la chapa para bobinado)

Las características dimensionales de la chapa de la bobina inicial pueden ser muy variadas. Se adecuarán según las necesidades de las piezas a realizar. Cada bobina se caracterizará por su anchura y su espesor de chapa. La anchura puede variar entre 50 mm hasta 1250 mm y el

espesor irá desde 0,15 mm hasta a 4 mm. El grosor de la chapa habitual de un perfil conformado en frío oscila entre 0,6 mm y 4 mm.

La fabricación de piezas de chapa acero conformada en frío se realiza a temperatura ambiente. En función del tipo que se quiera, el proceso de conformado en frío suele ser típicamente una estampación, un proceso de embutido, doblado y formado con Rodillos o bien un proceso de plegado.

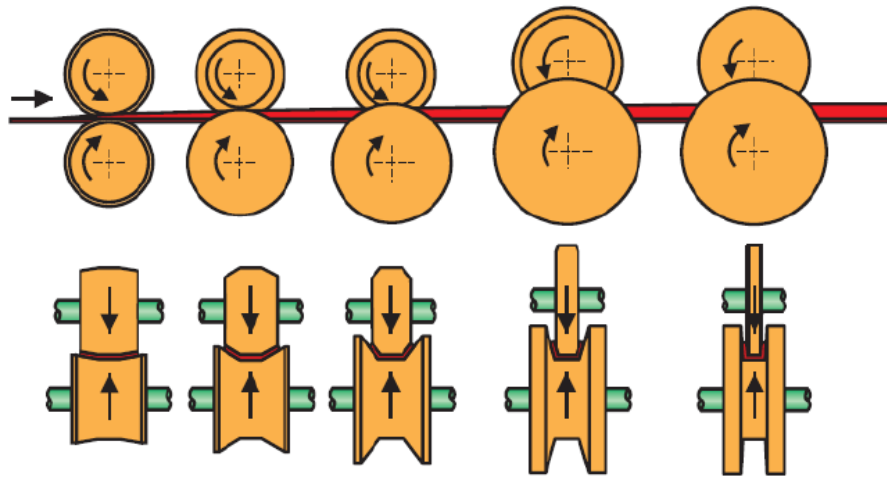


Fig. 2.7 Formado con rodillos de un elemento con sección en U

En el caso que estamos estudiando, para obtener el perfil nervado de la chapa de una cubierta curvada, ésta se conforma en primer lugar mediante un formado con Rodillos (Ver Fig. 2.7). Es un proceso similar al de laminación en frío. La diferencia es que prevalece el doblado sobre la compresión.



Fig. 2.8 Bobinas de chapa

Las bobinas (Ver Fig. 2.8) se hacen pasar por unos rodillos que desenrollan la chapa y la hacen pasar por otros rodillos que realizan en sí el conformado en frío. Este proceso se realiza en una perfiladora. En la figura siguiente, Fig. 2.9 se puede ver un ejemplo. Ésta máquina contiene los rodillos que son los que le confieren la forma y dimensiones de la greca a la chapa.



Fig. 2.9 Máquina perfiladora

La chapa curvada objeto de este proyecto tiene una segunda conformación en frío que es la que le dota de forma curva. Ésta se realiza por estampaciones transversales (embuticiones) entre 2 matrices. En las dos figuras siguientes, Fig. 2.10 y Fig. 2.11 se puede ver un ejemplo. La distancia de las embuticiones se fija en función del radio del arco a obtener y de la distancia de apoyo (luz). La profundidad y la separación de las embuticiones son los parámetros de diseño que determinan la geometría final de la chapa, o sea, del arco que forma y tienen relación directa con la resistencia portante máxima de la chapa.



Fig. 2.10 Máquina de estampación



Fig. 2.11 Detalle de la matriz

2.7 CUBIERTA CURVADA AUTOPORTANTE DE CHAPA DE ACERO CONFORMADA EN FRÍO EN EL MERCADO

En el mercado actual se pueden diferenciar dos grandes tipos de cubiertas curvadas autoportantes según sea el tipo de chapa a utilizar.

Por un lado tenemos una chapa grecada de acero conformada en frío y por otro lado la chapa de acero conformada en frío con una sola onda. Las cubiertas además podrán ser simples o de tipo sándwich.

Para ver algunos perfiles de chapa disponibles de varias empresas ver el **ANEJO H: Perfiles de chapa curvada en el mercado**, de este proyecto, donde se muestran los diferentes perfiles.

2.7.1 Chapa grecada de acero conformada en frío

La chapa presenta varias grecas. Éstas se colocarán una al lado de la otra y habrá un pequeño solape entre 2 chapas. A continuación se muestran como ejemplo perfiles de la firma Hoesch, Fig. 2.12.

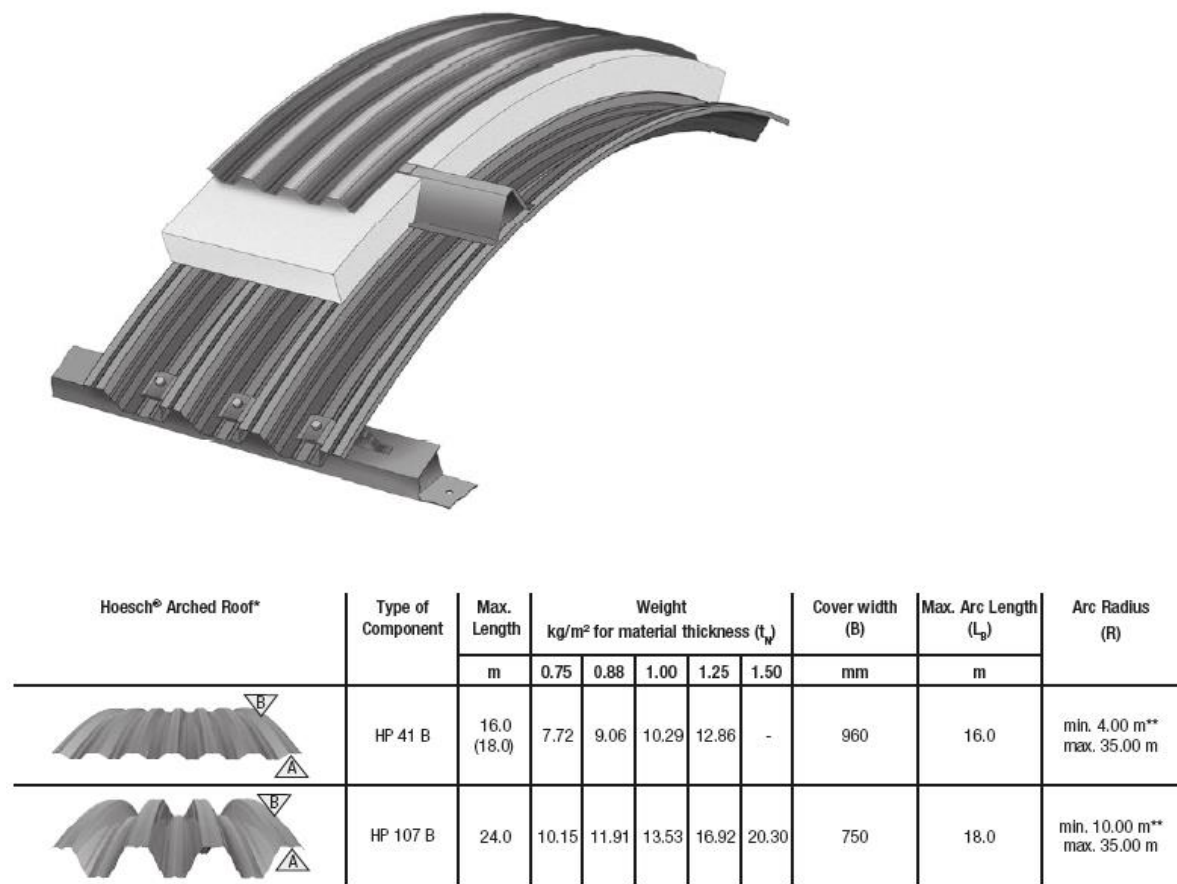


Fig. 2.12 Sistema y tabla de los perfiles grecados de la empresa Hoesch

2.7.2 Chapa de acero conformada en frío con una sola onda.

La chapa presenta una sola onda. Con este tipo se pueden alcanzar luces mayores de hasta 30 m. A continuación se muestran como ejemplo los perfiles de una sola onda de la firma Blocotelha Tabla 2.1 y Tabla 2.2



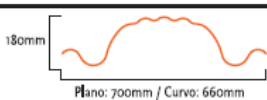
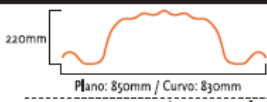


	BP 700 BC 700			
				
	Plano: 700mm / Curvo: 660mm		Plano: 850mm / Curvo: 830mm	
	Espesor [mm]	Peso [kg/m ²]	I _{eff} [cm ⁴]	A _{eff} [cm ²]
	0,80	11,21	6,15	12,00
	1,00	14,02	6,15	15,00
	1,12	15,70	6,11	17,00
	1,25	17,52	6,08	19,00
	1,50	22,00	6,39	22,00
	1,25	14,43	6,48	18,00
	1,50	17,32	6,39	22,00
	1,25	14,43	6,48	18,00
	1,50	17,32	6,39	22,00
	1,25	14,43	6,48	18,00
	1,50	17,32	6,39	22,00

Tabla 2.1 Sistema y tabla de los perfiles nono onda de la empresa Blocotelha.

PERFIL DE TEJA		LONGITUDES (en metros)																									
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
GEOMETRIA OMEGA	BC 700	Espesor [mm]																									
	BC 700	Rayo [m]																									
	BC 700	Flecha [m]																									
	BC 900	Espesor [mm]																									
	BC 900	Rayo [m]																									
Espesor [mm]		0,70 mm	0,80 mm	1,00 mm	1,12 mm	1,25 mm	1,50 mm	1,75 mm	2,00 mm	2,25 mm	2,50 mm	2,75 mm	3,00 mm	3,25 mm	3,50 mm	3,75 mm	4,00 mm	4,25 mm	4,50 mm	4,75 mm	5,00 mm	5,25 mm	5,50 mm	5,75 mm	6,00 mm	6,25 mm	6,50 mm

- Las longitudes y espesores a respetar para las cubiertas planas trapezoidales deben ser consultados en las tablas de Mapas de cargas de perfiles trapezoidales planos.
- Los gráficos representados son relativos a:
 - Edificios cerrados;
 - Situados en zonas con menos de 700mts de altitud y a mas de 5Km del mar.
 - Situados en zonas rurales y periferia de zonas urbanas (Tipo II; Rugosidad aerodinámica del suelo - art. 21)
 - Sobrecargas admisibles: 30 kg/m²
- La tabla no dispensa la consulta de nuestros servicios técnicos.

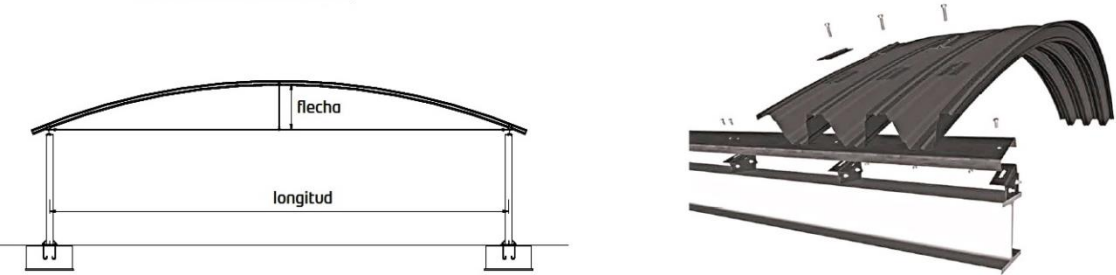


Tabla 2.2 Tabla de longitudes para perfiles mono onda de la marca Blocotelha.

3 BASES DE DISEÑO ESTRUCTURAL

El perfil de la chapa de acero curvada que se estudia en el presente proyecto es el modelo H68. La empresa que fabrica y comercializa dicho perfil, a la que llamaremos ChapaMet, ha solicitado un estudio del perfil al Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria, de la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (UPC) y este proyecto contiene dicho estudio.

En el **ANEJO A: Descripción del modelo y toma de decisiones**, de este proyecto se especifican con detalle los materiales a utilizar y se explica y se estructura todo lo necesario para la definición del modelo utilizado, así como la toma de decisiones llevadas a cabo para poder realizar las tablas de capacidades del perfil H68, que es el principal objetivo.

A continuación se especifican todos los datos utilizados en los análisis y cálculos para la determinación de la resistencia del perfil de la chapa de acero curvado: las características del acero empleado en su fabricación, la geometría, las características del cable utilizado, las condiciones de enlace y las flechas, así como las hipótesis de carga.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El diseño de un sistema constructivo de cubierta curvada autoportante de chapa de acero conformada en frío, se lleva a cabo mediante el perfil curvado H68 de chapa de acero conformada en frío. Se le designa perfil H68 porque tiene una altura de 68mm. Se estudia en concreto un perfil de espesor $t = 1,2\text{mm}$

Se trata de una chapa trapezoidal que se curva en forma de arco de circunferencia. Debido a su gran longitud de arco se coloca un cable en los extremos de la chapa (tirante de cable) para contribuir a la resistencia del arco en casos de presión. Se puede ver el esquema en la siguiente figura, Fig. 3.1. Se han realizado planos de la chapa y cable, los cuales se pueden ver en el **ANEJO I: Planos**. Además en el **ANEJO G: Catálogo de cables** se puede ver el catálogo de cables y de tirantes de donde se ha elegido el cable.

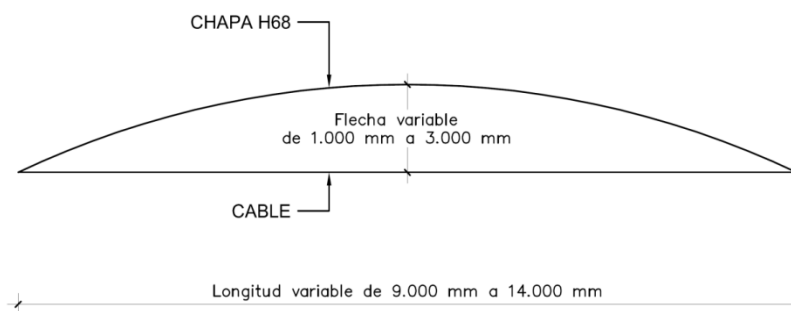


Fig. 3.1 Esquema de la cubierta con variabilidades de longitud y flecha

Las longitudes de arco de las cubiertas curvadas de chapa de acero conformada en frío estudiadas en este proyecto oscilan entre los 9 m y los 14 metros. En los análisis ejecutados, se irá incrementado la longitud en 0,5 m (o lo que se lo mismo en 500 mm) cada vez, desde los 9 m hasta los 14m. De la misma manera, las flechas del arco que describen se irán aumentando en 200 mm desde 1 m (1000 mm) hasta los 3 m (3000 mm). Así pues, tal y como muestra la siguiente tabla, Tabla 3.1, se realizan análisis de 121 parejas de longitud y flechas distintas.

CHAPA H68												
LONGITUD (mm)	NUMERACIÓN DE LOS CASOS ESTUDIADOS	PAREJAS DE LONGITUD-FLECHA ESTUDIADAS										
		FLECHA (mm)										
		1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
	9000	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	9500	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
	10000	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
	10500	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
	11000	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
	11500	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66
	12000	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77
	12500	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88
	13000	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99
	13500	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110
	14000	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121

Tabla 3.1 Numeración de los análisis ejecutados especificando Longitud-Flecha.

Anteriormente al estudio de esta chapa curvada, el Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, UPC, llevó a cabo otro estudio con las chapas H30, H40 y H55. En el año 2006 Miquel CASAFONT RIBERA y Frederic MARIMON CARVAJAL realizaron el documento [2], *Informe sobre la determinación de la capacidad de carga de los perfiles curvados h30, h40 y h55 fabricados por la empresa Metalperfil, S.A.*

El informe [2] estudiaba los perfiles curvados H30, H40 y H55 para longitudes de arco de entre 3 y 8 m. El presente proyecto trabaja sobre arcos de más longitud, de 9 a 14 m. Con lo que se han de buscar unos modelos apropiados.

3.2 GEOMETRÍA DEL PERFIL H68 (CHAPA CURVADA)

Se estudia el perfil curvado H68 de chapa de acero conformada en frío, en concreto el que tiene un espesor $t = 1,2\text{mm}$. Como puede verse en la siguiente figura, Fig. 3.2, la sección de perfil no es simétrica respecto al eje transversal. El perfil tiene la ala inferior mucho más ancha que la superior. La Tabla 3.2 contiene las propiedades brutas de la sección de este perfil sin curvar.

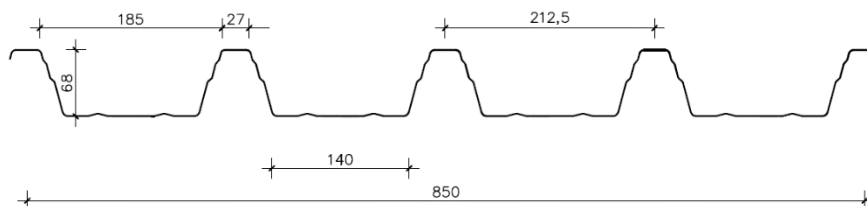


Fig. 3.2 Sección transversal del perfil de chapa estudiado H68.

Para el caso de los perfiles curvados se consideran válidas las mismas propiedades geométricas brutas. Aunque, las propiedades eficaces deben calcularse para tener en cuenta que la resistencia del perfil se ve reducida por el efecto de las embuticiones transversales que le dan la forma curva. Es necesario definir el área eficaz, el momento de inercia eficaz y el módulo resistente eficaz de la sección de tal forma que se contemple este efecto de las embuticiones de curvatura conjuntamente con el efecto de la abolladura local.

El procedimiento seguido para la determinación de las propiedades eficaces de los perfiles curvados se describe en la Tesis Doctoral de PEDRO CASARIEGO VALES. *Estudio de arcos estructurales obtenidos por embutición a partir de paneles nervados conformados en frío*. Barcelona 2014 [10]

En la Tabla 3.3 se muestran los valores que resultan de este procedimiento de cálculo, que serán utilizados en apartados posteriores para calcular la capacidad portante del perfil.

Cabe mencionar que las siguientes propiedades de la sección se han determinado mediante el método de los elementos finitos. Y que a día de hoy están pendientes de verificación experimental.

		PERFIL H68	
PROPIEDADES FÍSICAS BRUTAS		VALOR	UNIDADES
CHAPA RECTA	t	1,20	mm
	A	1.478,62	mm ² /m
	I	925.863,21	mm ⁴ /m
	W	20.510,93	mm ³ /m
	PP	13,50	kg/m/m

		PERFIL H68	
PROPIEDADES FÍSICAS		VALOR	UNIDADES
CHAPA CURVADA	t	1,20	mm
	A _{eff}	262,97	mm ² /m
	I _{eff}	438.758,64	mm ⁴ /m
	W _{eff+}	27.284,25	mm ³ /m
	W _{eff-}	11.956,18	mm ³ /m
	PP	13,50	kg/m/m

Tabla 3.2 Propiedades brutas del perfil H68 sin curvar.

Tabla 3.3 Propiedades eficaces de la sección del perfil H68 curvado

Los perfiles se curvan en forma de arco circular definido por los parámetros: cuerda o longitud de arco (L), flecha (f) y radio (r). Estos valores están relacionados entre sí por la siguiente expresión:

$$r = \frac{L^2 + 4f^2}{8f} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Los valores de resistencia que se calcularán de los perfiles, se presentan en función de la Longitud del arco (o cuerda) y la flecha de éste.

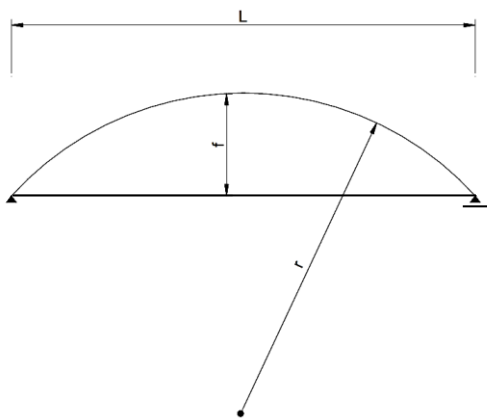


Fig. 3.3 Parámetros que definen la geometría del perfil (casos de presión)

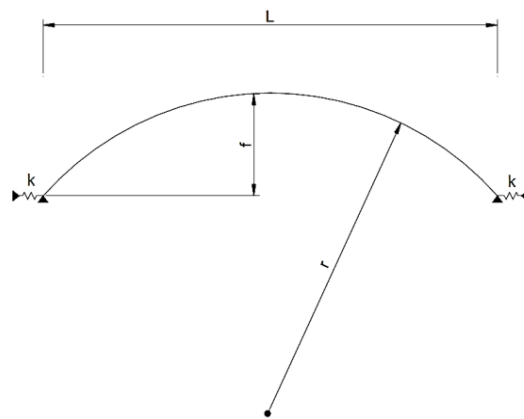


Fig. 3.4 Parámetros que definen la geometría del perfil (casos de succión)

Para realizar las simulaciones de los cálculos, se partirá de 2 modelos diferenciados según sean las cargas aplicadas en la chapa.

Si las cargas son de presión, el modelo se regirá por los parámetros que aparecen en la Fig. 3.3. Se unirán los extremos del arco descrito por la chapa. Para ello se colocarán unos cables separados cada 2,5 m (aprox. la anchura de 3 chapas, ya que cada una tiene 0,85 m de ancho)

Si las cargas son de succión, el modelo se regirá por los parámetros que aparecen en la Fig. 3.4. En ambos extremos del arco descrito por la chapa se colocarán unos elementos con una rigidez k que simulará la rigidez de la estructura soporte.

Los cálculos se han llevado a cabo con las propiedades del acero tipo S 280 GD, según nomenclatura del *Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero Parte 1-3: Perfiles y chapas de paredes delgadas conformadas en frío* [8] y la de *EAE Instrucción de Acero Estructural* [5], con:

$$f_y = 280 \text{ N/mm}^2 \quad y \quad f_u = 360 \text{ N/mm}^2$$

$$E = 210.000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \quad \nu = 0,3 \quad y \quad \gamma_M = 1,0$$

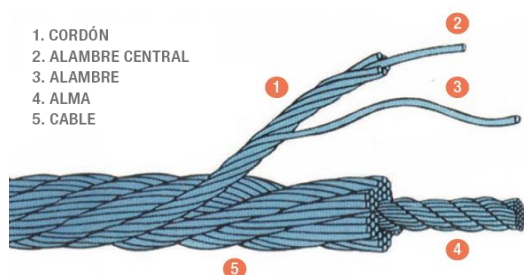
3.3 DESCRIPCIÓN Y GEOMETRÍA DE LOS CABLES

En el **ANEJO A: Descripción del modelo y toma de decisiones** se hace una descripción exhaustiva de los tipos de cable, así como también se realiza un razonamiento sobre el cable elegido y los demás elementos que componen los tirantes de cable. En el presente subapartado se indican el tipo de cable elegido y se muestran unas tablas resumen de los tirantes elegidos.

3.3.1 Cables

Bajo la denominación de cable se entiende, de una manera amplia, un conjunto de alambres que forman un cuerpo único como elemento de trabajo. Estos alambres pueden estar enrollados helicoidalmente en una o más capas, generalmente alrededor de un alambre central, formando los cables espirales o cordones, los cuales, enrollados a su vez helicoidalmente alrededor de un núcleo o alma, forman los cables de cordones múltiples.

La composición de un cable se designa por el número de sus cordones, la composición de estos y el tipo de alma



Rígido



Flexible



Semirígido

Fig. 3.5 Designación de las partes de un cable

Fig. 3.6 Cable rígido, flexible y semirígido

Dependiendo de la construcción del cable metálico se obtienen unas estructuras más rígidas que otras con resistencias diferentes para un mismo diámetro. Con mayor concentración de masa metálica por mm^2 , se tiene mayor resistencia pero también menor flexibilidad. Utilizando el concepto de flexibilidad podemos subdividir los cables en rígidos (Presentan el módulo elástico más elevado de los cables de acero), flexibles (Utilizados cuando se precisa flexibilidad durante el trabajo del cable como en paso por poleas, enrollamiento en tambores, etc.) y semirígidos.

3.3.2 Elección del cable

Cable elegido: 7x19 Acero inoxidable AISI316 $\phi_{\text{cable}} = 16 \text{ mm}$, con una sección metálica de, $A_{\text{cable}} = 111 \text{ mm}^2$, $E = 100.000 \text{ N/mm}^2$ y una resistencia del tirante $N_u = 12.240 \text{ kg} \approx 120.074 \text{ N} \approx 120 \text{ kN}$

Las características de los tirantes elegidos se resumen en las 2 tablas siguientes:


				
		TIRANTE DE CABLE longitud variable de 9 hasta 12 m		
MATERIAL		Acero inoxidable AISI316		
CARACTERÍSTICAS		VALOR	UNIDADES	
CABLE	Tipo	7x19	-	
	$f_{y,cable}$	1.570	N/mm ²	
	Módulo elástico, E	100.000	N/mm ²	
	ϕ_{cable}	16	mm	
	Sección metálica	111	mm ²	
	Carga de rotura	133,42	kN	
TERMINALES	IZQUIERDO	Tipo	Horquilla soldada	-
		Tensor	-	-
		M	-	-
		Variación tensor	-	-
		Abierto/cerrado	-	-
		Amplitud de variación	-	-
		Tensor	-	-
		Tensor abierto al	-	-
	DERECHO	Tipo	Horquilla soldada	-
		Tensor	SI	-
		M	M24	-
		Variación tensor	-	-
		Abierto/cerrado	863/630	mm
		Amplitud de variación	-	-
		Tensor	233	mm
		Tensor abierto al	50	%
CARGA ROTURA TIRANTE		120	kN	

Tabla 3.4 TIRANTE DE CABLE de longitud variable, de 9 hasta 12 m


				
		TIRANTE DE CABLE longitud variable de 12 hasta 14 m		
MATERIAL		Acero inoxidable AISI316		
CARACTERÍSTICAS		VALOR	UNIDADES	
CABLE	Tipo	7x19	-	
	$f_{y,cable}$	1.570	N/mm ²	
	Módulo elástico, E	100.000	N/mm ²	
	ϕ_{cable}	16	mm	
	Sección metálica	111	mm ²	
	Carga de rotura	133,42	kN	
TERMINALES	IZQUIERDO	Tipo	Horquilla soldada	-
		Tensor	SI	-
		M	M24	-
		Variación tensor		
		Abierto/cerrado	863/630	mm
		Amplitud de variación		
		Tensor	233	mm
		Tensor abierto al	50	%
	DERECHO	Tipo	Horquilla soldada	-
		Tensor	SI	-
		M	M24	-
		Variación tensor		
		Abierto/cerrado	863/630	mm
		Amplitud de variación		
		Tensor	233	mm
		Tensor abierto al	50	%
CARGA ROTURA TIRANTE		120	kN	

Tabla 3.5 TIRANTE DE CABLE de longitud variable, de 12 hasta 14 m

3.4 CONDICIONES DE ENLACE

En las figuras, Fig. 3.3 y Fig. 3.4, de la pág. 18 se muestran los 2 casos de modelos que se realizan para hacer este estudio, tal y como se ha comentado anteriormente.

Para el MODELO 1, caso de presión, los enlaces en los extremos del perfil se tratan de la siguiente forma:

- En la dirección vertical se impone un desplazamiento nulo.
- En la dirección horizontal y el extremo izquierdo se impone un desplazamiento nulo.
- En la dirección horizontal y el extremo derecho se considera un desplazamiento posible

Para el MODELO 2, caso de succión, los enlaces en los extremos del perfil se tratan de la siguiente forma:

- En la dirección vertical se impone un desplazamiento nulo.
- En la dirección horizontal se considera un enlace de rigidez k en cada extremo, que simulará la rigidez de la estructura soporte.
Se estudia para diferentes valores de K (N/mm cada m):
 $K=250$, $K=350$, $K=550$ y $K=750$

3.5 FLECHAS VERTICALES ADMISIBLES

En un inicio, los casos a estudiar se calculan teniendo en cuenta que el ELS estado límite de servicio cumpla con una flecha máxima vertical de $L/200$.

Se mantuvo una reunión con ChapaMet para explicarles cómo se estaba realizando el estudio y de qué datos se partiría para realizarlo. Después de ver algunos resultados que el estudio arrojaba, ChapaMet indica que consideran la flecha máxima admisible que se está utilizando demasiado restrictiva y que se podría cambiar por una flecha máxima de $L/150$.

Después de consultar diferentes fuentes de estructuras como puede ser el libro de Ramón Argüelles *Estructura de acero* [1] se consideran admisibles flechas de $L/150$. Ahora bien, la limitación de flecha de $L/150$ se considera adecuada si se estuviera diseñando un elemento de cerramiento convencional, con una función estructural secundaria. En el caso de la cubierta autoportante curvada, su función estructural es principal. Por esta razón, se cree conveniente utilizar una limitación de flecha más restrictiva, de $L/180$, que es una limitación común en correas, un elemento con función estructural.

Después de volverlo a comentar con ChapaMet, al final se decide calcular por duplicado los resultados de todas las situaciones de este proyecto, para una flecha máxima admisible de $L/150$ y para otra de $L/200$.

Para tal fin, cada cálculo se ejecutará 2 veces. La primera vez, para que se cumpla con la especificación:

$$\text{Flecha} < F_{\text{adm}} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Siendo $F_{\text{adm}} = L/150$

Y la segunda vez, para que cumpla con la misma especificación, (Ec. 3.2) pero en cambio, siendo:

$$F_{\text{adm}} = L/200$$

El programa con el que se realizarán los cálculos, Ansys, (por medio de unos scripts o macros que se diseñan) escribe un fichero de resultados por separado, para cada una de estas dos flechas máximas admisibles

3.6 COEFICIENTES DE SEGURIDAD DE LAS ACCIONES CONSIDERADAS

Para el Estado Límite Último, el cálculo se lleva a cabo aplicando la siguiente combinación de cargas:

$$\gamma_G \cdot q_G + \gamma_Q \cdot q_Q \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Dónde:

- γ_G Es el coeficiente parcial de seguridad para las acciones permanentes. Se le asigna un valor de $\gamma_G = 1,35$
- γ_Q Es el coeficiente parcial de seguridad para las acciones variables. Se le asigna un valor de $\gamma_Q = 1,50$
- q_G Es una acción permanente. Se tiene en cuenta únicamente la acción del peso propio del perfil.
- q_Q Es una acción variable.

Los coeficientes de seguridad adoptados para el Estado Límite Último son: $\gamma_G = 1,35$ y $\gamma_Q = 1,50$ tal y como marca la *EAE Instrucción de Acero Estructural* [5].

Para el Estado Límite de Servicio (cálculo del desplazamiento vertical máximo y cálculo de las reacciones horizontales en los apoyos), el cálculo se lleva a cabo aplicando la misma combinación de cargas:

$$\gamma_G \cdot q_G + \gamma_Q \cdot q_Q \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Dónde:

- γ_G Es el coeficiente parcial de seguridad para las acciones permanentes. Se le asigna un valor de $\gamma_G = 1$
- γ_Q Es el coeficiente parcial de seguridad para las acciones variables. Se le asigna un valor de $\gamma_Q = 1$
- q_G Es una acción permanente. Se tiene en cuenta únicamente la acción del peso propio del perfil.
- q_Q Es una acción variable.

Los coeficientes γ_G y γ_Q para el estado Límite de Servicio se tomarán valor igual a 1, para las mismas hipótesis de carga que para el Estado Límite Último, también según la EAE [5],

Cuando se proceda a la verificación de los elementos de sujeción del perfil, como el cálculo de la reacción horizontal en los apoyos se realiza con los coeficientes $\gamma_G = \gamma_Q = 1$, o sea, para el Estado Límite de Servicio, las reacciones indicadas en las tablas se deberán multiplicar por el coeficiente de seguridad que especifique el fabricante del sistema de fijación.

3.7 HIPÓTESIS DE CARGA CONSIDERADAS

Se consideran las siguientes 6 hipótesis de carga distintas, que son función de la acción variable, tal y como podemos ver en las figuras, Fig. 3.8 y Fig. 3.9, además de 2 hipótesis de combinación de viento y nieve.

- 1) Hipótesis gravitatoria uniforme, (caso de actuar la nieve uniformemente).
- 2) Hipótesis gravitatoria no uniforme (caso de actuar la nieve no uniformemente, es decir, con acumulación en uno de los 2 lados de la chapa).
- 3) Hipótesis de carga puntual centrada (caso en el que una persona esté encima de la chapa realizando labores de mantenimiento y se sitúe en el centro del arco)
- 4) Hipótesis de carga puntual descentrada (caso en el que una persona esté encima de la chapa realizando labores de mantenimiento y se sitúe a L/4 del arco)
- 5) Hipótesis de succión uniforme (caso en el que el viento actúe a succión uniforme) "Viento frontal"
- 6) Hipótesis de viento o succión y/o presión no uniforme (caso en el que el viento no actúe uniformemente en toda la chapa curva) "Viento lateral"

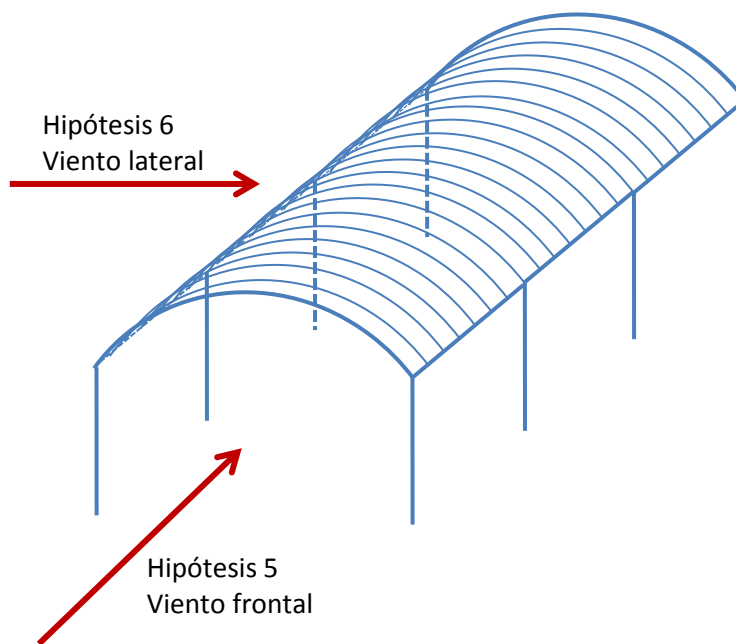


Fig. 3.7 Dirección viento frontal y viento lateral

Dentro de la hipótesis 6 de viento o succión y/o presión no uniforme, tal y como se ve más adelante se han considerado diferentes casos. Estos casos de la hipótesis 6, se diferenciarán entre sí dependiendo del tipo de edificación dónde se instale la cubierta curvada autoportante de chapa de acero conformada en frío, que podrá ser:

- Edificio cerrado
- Edificio con grandes huecos
- Marquesina

Los esquemas de los diferentes casos de esta hipótesis 6 de viento, succión y/o presión se encuentran en la Tabla 3.6

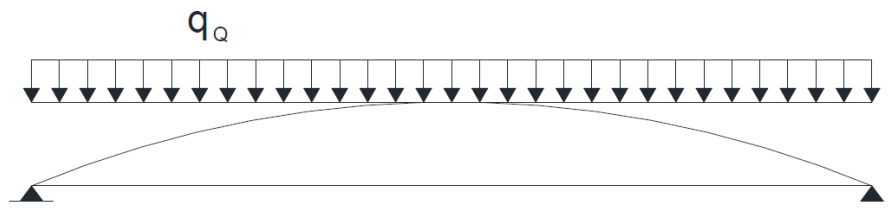
Las 2 hipótesis de combinación de viento y nieve que también se han considerado son:

- | | |
|----------------|---|
| COMBINACIÓN 1) | Hipótesis gravitatoria uniforme + Hipótesis de presión no uniforme (caso de actuar la nieve uniformemente y que el viento actúe de una forma no uniforme en toda la cubierta curvada, viento lateral) |
| COMBINACIÓN 2) | Hipótesis gravitatoria no uniforme + Hipótesis de viento no uniforme (caso de actuar la nieve no uniformemente, con acumulación en uno de los 2 lados y que el viento actúe de una forma no uniforme en toda la cubierta curvada, viento lateral) |

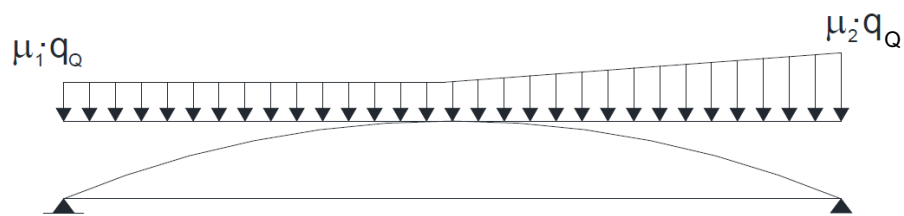
En la Tabla 3.9 se recogen los esquemas de las hipótesis de COMBINACIÓN estudiadas.

HIPÓTESIS DE CARGAS CONSIDERADAS

1. Gravitatoria uniforme



2. Gravitatoria no uniforme



3. Puntual centrada

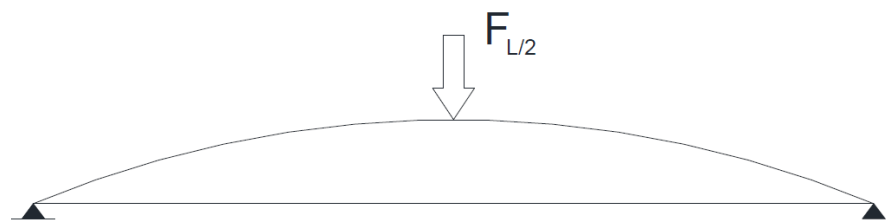
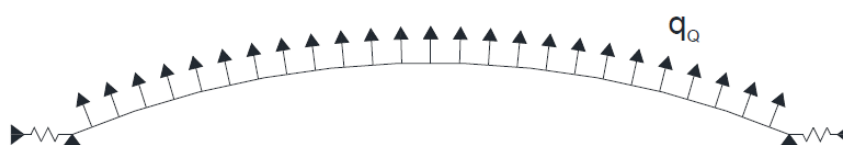


Fig. 3.8 Hipótesis de carga 1, 2 y 3

4. Puntual descentrada



5. Succión uniforme



6. Succión no uniforme

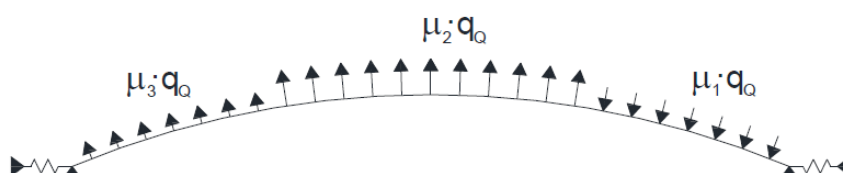


Fig. 3.9 Hipótesis de carga 4, 5 y 6

3.7.1 Coeficientes μ_1 , μ_2 y μ_3 para las hipótesis 2 y 6

Tal y como se puede observar en las figuras Fig. 3.8 y Fig. 3.9, en las hipótesis de carga no uniforme (nieve no uniforme y viento no uniforme), la carga va multiplicada por unos coeficientes μ . En el caso de la nieve serán 2 coeficientes μ_1 y μ_2 y se llamarán coeficientes de forma. En el caso del viento serán 3 coeficientes μ_1 , μ_2 y μ_3 y será los coeficientes eólicos o de presión.

Se puede ver la el proceso de la determinación de estos coeficientes μ y sus valores en el **ANEJO A: Descripción del modelo y toma de decisiones**

3.7.2 Estudio de las hipótesis de viento no uniforme, viento lateral.

Se hace un estudio de los diferentes casos de la hipótesis 6 para determinar cuáles son los más desfavorables y decidir así, de entre todos ellos, de cuales se realizaran las tablas de capacidades. En este estudio de esta hipótesis 6 de viento o succión y/o presión no uniforme, viento lateral, los casos que se tienen en cuenta son:

- **Caso 1 (Edificio cerrado)**
 - Caso 1a (Todo succión)
 - Caso 1b (Parte Presión, parte succión)
- **Caso 2 (Edificio con grandes huecos)**
 - Caso 2a (presión interior):
Caso 1a + Presión Interior
 - Caso 2b (succión interior):
Caso 1b + Succión Interior
- **Caso 3 (Marquesina, asimilada a marquesina a 2 aguas)**
 - Caso 3a (succión)
 - Caso 3b (presión)

Este estudio consiste en calcular los mismos valores que luego se calcularán para realizar las tablas de capacidades, pero sólo de algunas situaciones de cada caso. En vez de calcular 121 situaciones, que son las que se estudian al hacer cada una de las tablas de capacidad, en este estudio se deciden analizar 3 muestras de parejas Longitud-flecha de cada caso. Éstas tienen las siguientes longitudes de arco y flecha:

L=9000 y f=1000

L=12000 y f=2000

L=14000 y f=3000

En los casos de carga asimétrica, 1a, 1b, 2a y 2b, se estudian los modelos introduciendo una imperfección según el primer modo de pandeo (Ver Fig. 3.11). Se realiza el estudio introduciendo esta imperfección primero hacia un lado y luego hacia el otro lado.

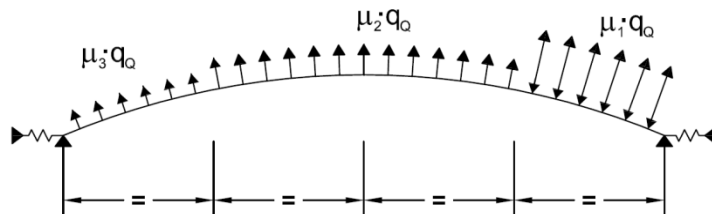


Fig. 3.10 Esquema de carga de los casos 1a, 1b, 2a y 2b

Es decir, primero implementando las cargas de izquierda a derecha de la siguiente forma:

$$\mu_3 \cdot q_Q \quad \mu_2 \cdot q_Q \quad \mu_1 \cdot q_Q$$

Y después de esta otra forma:

$$\mu_1 \cdot q_Q \quad \mu_2 \cdot q_Q \quad \mu_3 \cdot q_Q$$

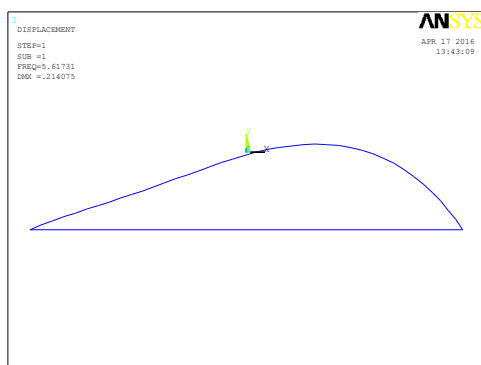


Fig. 3.11 Forma del primer modo pandeo del arco

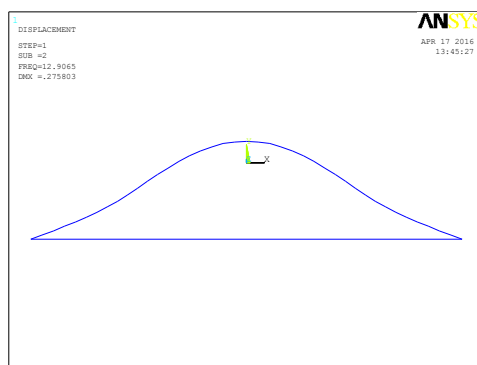


Fig. 3.12 Forma del segundo modo pandeo del arco

En los casos de carga simétrica, 3a y 3b además de estudiar los modelos introduciendo una imperfección según el primer modo de pandeo, también se hará para el segundo modo de pandeo (ver Fig. 3.12). Asimismo el estudio con este segundo modo de pandeo se realizará introduciendo la imperfección hacia arriba y después también hacia abajo.

Se diseña una macro de Ansys para cada combinación o permutación y se calculan las cargas máximas de la chapa curvada para cada una de las 3 muestras anteriores de cada permutación; carga última (q_{ul}) y carga de servicio (q_{els}).

En la Tabla 3.6 se muestran los casos evaluados y sus esquemas de carga, y en la Tabla 3.7 se muestran las permutaciones tenidas en cuenta.

En el **ANEJO A: Descripción del modelo y toma de decisiones** se pueden ver con detalle todos los valores y el estudio realizado. También se razona sobre la conclusión a la que se llega.

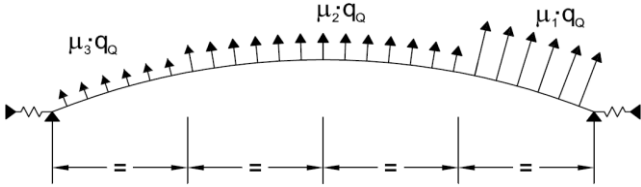
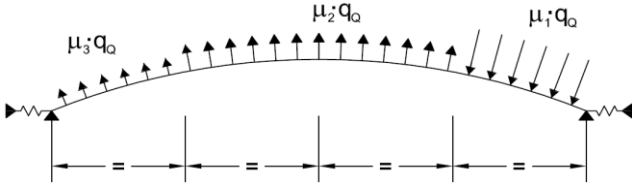
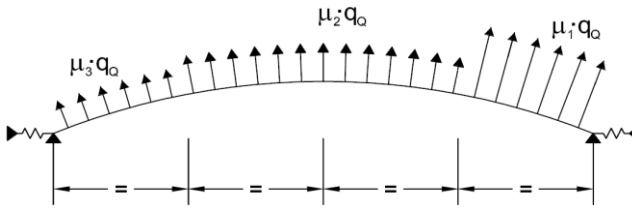
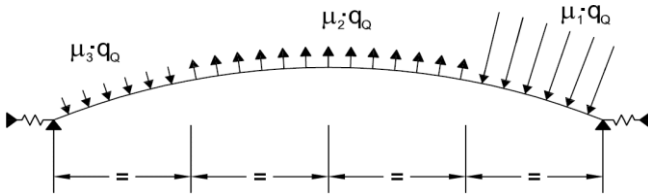
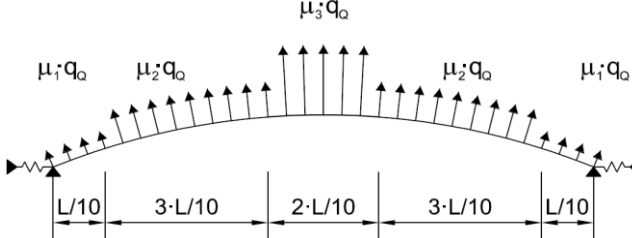
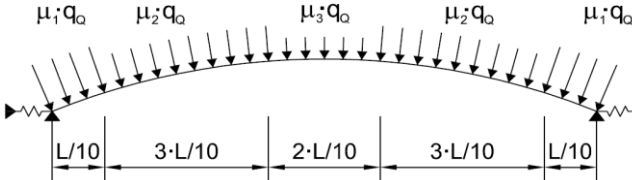
CASO	HIPÓTESIS DE CARGA 6: VIENTO NO UNIFORME	
	Subcaso	Esquema hipótesis de carga
CASO 1 edificio cerrado	caso1a	
	caso1b	
CASO 2 Edificio con grandes huecos	caso2a	
	caso2b	
CASO 3 Marquesina	caso3a	
	caso3b	

Tabla 3.6 Casos de la hipótesis 6 de viento no uniforme

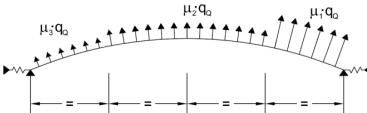

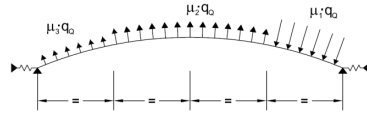

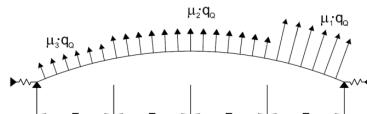

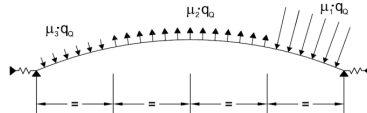

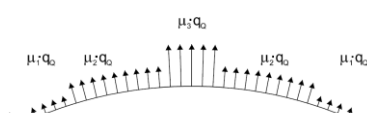



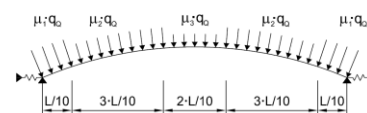



HIPÓTESIS DE CARGA 6: VIENTO NO UNIFORME				
Permutación	Caso hipótesis de carga	Imperfección según modo de pandeo	Cargas de izquierda a derecha	
caso1a_mod1			$\mu_3 \cdot q_0, \mu_2 \cdot q_0, \mu_1 \cdot q_0$	
caso1a_mod1 _Carga al revés			$\mu_1 \cdot q_0, \mu_2 \cdot q_0, \mu_3 \cdot q_0$	
caso1b_mod1			$\mu_3 \cdot q_0, \mu_2 \cdot q_0, \mu_1 \cdot q_0$	
caso1b_mod1 _Carga al revés			$\mu_1 \cdot q_0, \mu_2 \cdot q_0, \mu_3 \cdot q_0$	
caso2a_mod1			$\mu_3 \cdot q_0, \mu_2 \cdot q_0, \mu_1 \cdot q_0$	
caso2a_mod1 _Carga al revés			$\mu_1 \cdot q_0, \mu_2 \cdot q_0, \mu_3 \cdot q_0$	
caso2b_mod1			$\mu_3 \cdot q_0, \mu_2 \cdot q_0, \mu_1 \cdot q_0$	
caso2b_mod1 _Carga al revés			$\mu_1 \cdot q_0, \mu_2 \cdot q_0, \mu_3 \cdot q_0$	
caso3a_mod1			$\mu_1 \cdot q_0, \mu_2 \cdot q_0, \mu_3 \cdot q_0, \mu_2 \cdot q, \mu_1 \cdot q_0$	
caso3a_mod2 _imperfección hacia arriba			$\mu_1 \cdot q_0, \mu_2 \cdot q_0, \mu_3 \cdot q_0, \mu_2 \cdot q, \mu_1 \cdot q_0$	
caso3a_mod2 _imperfección hacia abajo			$\mu_1 \cdot q_0, \mu_2 \cdot q_0, \mu_3 \cdot q_0, \mu_2 \cdot q, \mu_1 \cdot q_0$	
caso3b_mod1			$\mu_1 \cdot q_0, \mu_2 \cdot q_0, \mu_3 \cdot q_0, \mu_2 \cdot q, \mu_1 \cdot q_0$	
caso3b_mod2 _imperfección hacia arriba			$\mu_1 \cdot q_0, \mu_2 \cdot q_0, \mu_3 \cdot q_0, \mu_2 \cdot q, \mu_1 \cdot q_0$	
caso3b_mod2 _imperfección hacia abajo			$\mu_1 \cdot q_0, \mu_2 \cdot q_0, \mu_3 \cdot q_0, \mu_2 \cdot q, \mu_1 \cdot q_0$	

Tabla 3.7 Permutaciones estudiadas de la hipótesis 6 de viento no uniforme

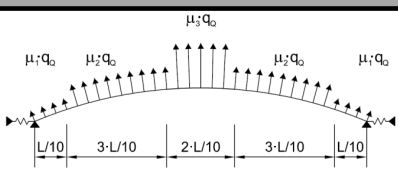
SUCCIÓN NO UNIFORME					
CASO		CASO 3a			
					<u>COLORES</u> Valor de carga menor Valor de carga mayor
		caso3a_mod1	caso3a_mod2 _imperfección hacia arriba	caso3a_mod2 _imperfección hacia abajo	Caso más desfavorable
Variables calculadas L = 9000 y f = 1000	L	9000	9000	9000	caso3a_mod1 o caso3a_mod2_imperf ección hacia abajo
	f	1000	1000	1000	
	qul	1,6	1,8	1,6	
	Nul	20390,434	22622,7516	20526,9431	
	N1ul	20356,9838	22622,7516	20526,9431	
	Rxul	-17642,5951	-19469,0078	-17800,5141	
	Rx1ul	17626,7503	19469,0078	17800,5141	caso3a_mod2_imperf ección hacia arriba
	qels	0,516666667	0,5	0,516666667	
	Fadm	60	60	60	
	Flecha	57,8268505	53,2725096	59,6638781	
	despl	15,9250885	15,1508619	16,1111372	
	despl2	-15,9060037	-15,1508619	-16,1111372	
Variables calculadas L = 12000 y f = 2000	L	12000	12000	12000	caso3a_mod2_imperf ección hacia abajo
	f	2000	2000	2000	
	qul	2,3	2,6	1,95	
	Nul	31833,2348	35789,5783	27097,4851	
	N1ul	31810,1627	35789,5783	27097,4851	
	Rxul	-24763,7739	-27695,0411	-21215,1329	
	Rx1ul	24747,132	27695,0411	21215,1329	caso3a_mod2_imperf ección hacia arriba
	qels	0,933333333	0,833333333	0,85	
	Fadm	80	80	80	
	Flecha	79,9449147	63,4957467	77,9416482	
	despl	28,8070579	25,4167987	26,1297243	
	despl2	-28,7765086	-25,4167987	-26,1297243	
Variables calculadas L = 14000 y f = 3000	L	14000	14000	14000	caso3a_mod2_imperf ección hacia abajo
	f	3000	3000	3000	
	qul	2,45	2,95	2,1	
	Nul	34326,6933	41260,1387	29398,366	
	N1ul	34308,8745	41260,1387	29398,366	
	Rxul	-23499,3792	-28041,1597	-20233,9558	
	Rx1ul	23485,7696	28041,1597	20233,9558	caso3a_mod1
	qels	1,033333333	1,066666667	1,1	
	Fadm	93,33333333	93,33333333	93,33333333	
	Flecha	76,4772378	64,6104959	91,0712117	
	despl	27,847345	28,7321362	29,828811	
	despl2	-27,8185974	-28,7321362	-29,828811	

Tabla 3.8 Resultado combinaciones caso 3a

En la tabla anterior Tabla 3.8 se muestran los resultados para las permutaciones del caso 3a. En ella se han marcado, en color rojo, el valor menor de las cargas, y en verde, el valor mayor. En la columna de la derecha se hace referencia a la permutación más desfavorable. Para ver los resultados de todas las combinaciones tenidas en cuenta, ver el **ANEJO A: Descripción del modelo y toma de decisiones**

Una vez hecho el estudio, con todos los resultados evaluados, se observan que las combinaciones más desfavorables o más restrictivas de cada caso son:

- CASO 1: Caso 1a_mod1_Carga al revés (succión)
- CASO 2: Caso 2a_mod1_Carga al revés (succión)
- CASO 3: $\left\{ \begin{array}{l} \text{Caso 3a_mod2_imperfección hacia abajo (succión)} \\ \text{Caso 3b_mod1 (presión)} \end{array} \right.$

La conclusión que se extrae de este estudio es por tanto, que de todas las permutaciones estudiadas, nos podemos quedar con las anteriores, que son más restrictivas.

Por tanto, estas 4 combinaciones serán las que se estudien para la hipótesis 6 de viento no uniforme o viento lateral, a la hora de realizar las tablas de capacidades del perfil H68.

En este estudio se observa a su vez, que todas las combinaciones de succión se podrían englobar en: Caso 3a_mod2_imperfección hacia abajo. Ya que ésta última es la más restrictiva de todas.

Por tanto si se desearan simplificar los casos a estudiar, podrían tenerse en cuenta sólo las situaciones más desfavorables del caso 3 (marquesina)

Hipótesis 6 simplificada $\left\{ \begin{array}{l} \text{Caso 3a_mod2_imperfección hacia abajo (succión)} \\ \text{Caso 3b_mod1 (presión)} \end{array} \right.$

3.7.3 COMBINACIÓN 1 y COMBINACIÓN 2 de hipótesis

En la Tabla 3.9 se exponen los esquemas de las combinaciones de carga estudiados: COMBINACIÓN 1 Y COMBINACIÓN 2

El estudio de estas combinaciones consiste en calcular algunos casos de cada hipótesis de combinación y observar si se pueden equiparar a alguna única hipótesis estudiada o bien a alguna combinación de ellas sin necesidad de calcular y generar completamente nuevas tablas de capacidad.

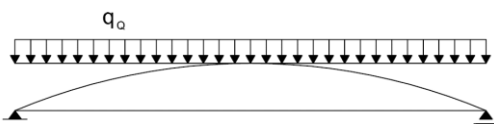
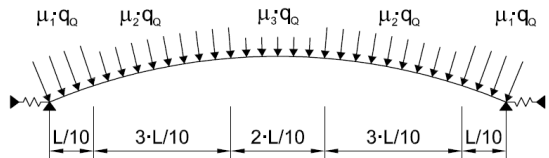
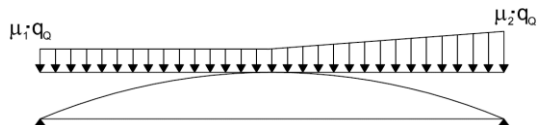
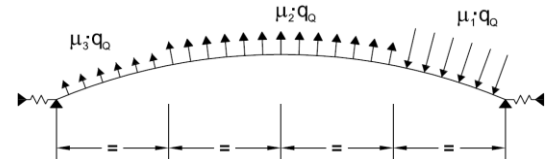
Número de COMBINACIÓN	EXPLICACIÓN	COMBINACIONES DE HIPÓTESIS DE CARGA		
		nº Hipótesis	Descripción	Esquemas hipótesis de carga
COMBINACIÓN 1: Hipótesis gravitatoria uniforme + Hipótesis de presión no uniforme	Caso de actuar la nieve no uniformemente y que el viento actúe de una forma no uniforme en toda la cubierta curvada	1	Hipótesis gravitatoria uniforme	
		6 Caso 3b	Hipótesis de presión no uniforme	
COMBINACIÓN 2: Hipótesis gravitatoria no uniforme + Hipótesis de viento no uniforme.	Caso de actuar la nieve no uniformemente (con acumulación en uno de los 2 lados) y que el viento actúe de una forma no uniforme en toda la cubierta curvada	2	Hipótesis gravitatoria no uniforme	
		6 Caso 1b	Hipótesis de viento no uniforme	

Tabla 3.9 Combinaciones de hipótesis estudiadas

Para ello se deciden estudiar 3 muestras de parejas Longitud-flecha de cada caso, las mismas que en el estudio de las hipótesis de viento no uniforme. Éstas tienen las siguientes longitudes de arco y flecha:

$$L=9000 \text{ y } f=1000$$

$$L=12000 \text{ y } f=2000$$

$$L=14000 \text{ y } f=3000$$

3.7.4 Estudio de la COMBINACIÓN 1

Hipótesis gravitatoria uniforme + Hipótesis de presión no uniforme

(Caso de actuar la nieve uniformemente y que el viento actúe de una forma no uniforme en toda la cubierta curvada)

Se asigna a esta COMBINACIÓN 1 el 50% de la hipótesis 1 y 50% de la hipótesis 6 caso 3b. En la siguiente tabla, Tabla 3.10 se muestran los esquemas de las hipótesis combinadas y su contribución. Luego, se calculan las cargas máximas de la chapa curvada para los 3 casos anteriores, carga última (q_{ul}) y carga de servicio (q_{els}).

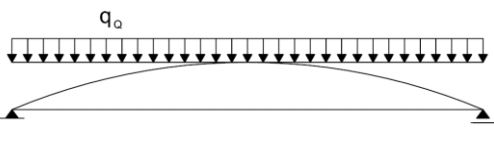
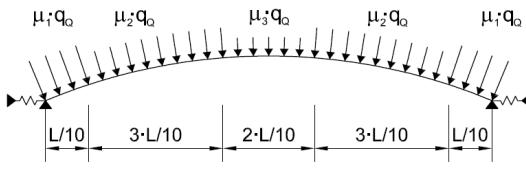
COMBINACIÓN 1		
SITUACIÓN ESTUDIADA	% CONTRIBUCIÓN HIPÓTESIS	
	Hipótesis 1	Hipótesis 6 (caso 3b)
	50%	50%
		

Tabla 3.10 COMBINACIÓN 1: situación estudiada

De la misma forma que en la COMBINACIÓN 1, se diseñan otras combinaciones de comparación, en las que la carga proviene del 50 % de la nieve uniforme y el otro 50 % de otra carga distribuida uniforme gravitatoria multiplicada por un coeficiente. Tal y como se muestra en la siguiente tabla, Tabla 3.11, estas combinaciones de comparación se realizan para los coeficientes: 1,30; 1,24; 1,15 y 1.

Después se comparan los resultados de todos los casos calculados.

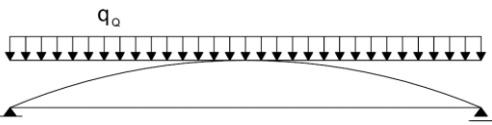
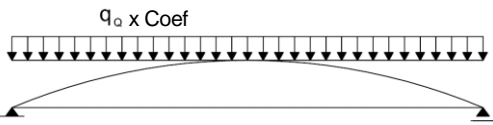
COMPARACIÓN COMBINACIÓN 1		
Nº COMPARACIÓN	% CONTRIBUCIÓN HIPÓTESIS	
	Hipótesis 1	Hipótesis 1 x Coef
		
1	50%	50% (Coef = 1,30)
2	50%	50% (Coef = 1,24)
3	50%	50% (Coef = 1,15)
4	50%	50% (Coef = 1,00)

Tabla 3.11 COMBINACIÓN 1: situaciones comparadas

Con esto se quiere estudiar la posibilidad de asimilar la parte de la carga de viento de la COMBINACIÓN 1 de hipótesis, a una carga distribuida uniforme gravitatoria multiplicada por un coeficiente.

En el **ANEJO A: Descripción del modelo y toma de decisiones** se pueden ver con detalle todos los valores y el estudio realizado. También se razona sobre la conclusión a la que se llega.

Tal y como se puede leer en el subapartado *Conclusión del estudio de la COMBINACIÓN 1*, del **ANEJO A** esta combinación donde el 50 % de la carga es debida a la distribución uniforme de nieve y el otro 50% proviene del viento no uniforme de presión (50% hipótesis 1 y 50% hipótesis 6 caso 3b) se puede sustituir por el estudio único de la hipótesis 1 (distribución uniforme de carga gravitatoria)

3.7.5 Estudio de la COMBINACIÓN 2

Hipótesis gravitatoria no uniforme + Hipótesis de succión y/o presión no uniforme.

(Caso de actuar la nieve no uniformemente, es decir, con acumulación en uno de los 2 lados de la chapa y que el viento actúe de una forma no uniforme en toda la cubierta curvada)

En esta combinación se une la hipótesis 2 (nieve no uniforme) con la hipótesis 6 caso 1b.

Se asignan a esta COMBINACIÓN 2 varias situaciones de porcentaje variable de la hipótesis 1 y de porcentaje variable también de la hipótesis 6 caso 1b. (ver Tabla 3.12). Se calculan las cargas máximas de la chapa curvada para los 3 casos mencionados anteriores, y para cada una de las situaciones; carga última (q_{ul}) y carga de servicio (q_{els}).

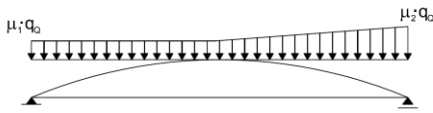
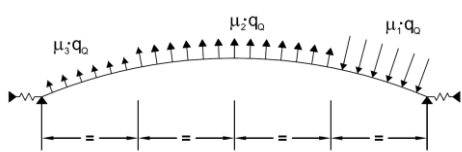
COMBINACIÓN 2		
Nº SITUACIÓN	% CONTRIBUCIÓN HIPÓTESIS	
	Hipótesis 2	Hipótesis 6 (caso 1b)
		
1	90%	10%
2	75%	25%
3	50%	50%
4	25%	75%
5	10%	10%

Tabla 3.12 COMBINACIÓN 2: situaciones estudiada

En el **ANEJO A: Descripción del modelo y toma de decisiones** se pueden apreciar detalladamente todos los valores y el estudio realizado. Además se explica la conclusión a la que se llega.

Del subapartado *Conclusión del estudio de la COMBINACIÓN 2*, del **ANEJO A** se puede extraer que esta combinación donde se combina la hipótesis 2 (nieve no uniforme) con la hipótesis 6 caso 1b (viento no uniforme) se puede sustituir por el estudio por separado de la hipótesis 2 y la hipótesis 6 caso 1b.

4 ANÁLISIS Y DIMENSIONADO DE LA CUBIERTA

En este apartado se explica el método del análisis llevado a cabo y las verificaciones realizadas. También se explica cómo se calculan las rigideces de los soportes de la cubierta autoportante curvada necesarias para el caso de succión.

4.1 MÉTODO DE ANÁLISIS DEL ARCO

La simulación de las diferentes hipótesis de carga, de la cubierta curva autoportante, se lleva a cabo mediante el método de los elementos finitos, con el programa comercial ANSYS. Se modeliza la cubierta como un arco.

Se trata de un análisis con un modelo bidimensional en el que el arco se divide en 40 elementos barra, elementos BEAM 3 de ANSYS. En el caso de presión, (MODELO 1) entre los extremos del arco se colocará un cable aproximadamente cada 2,5 metros, que se modelará con un elemento LINK 180 de ANSYS (lineal). Además, en los apoyos extremos, para el caso de succión (MODELO 2, caso de que el cable no esté traccionado), se colocan elementos tipo resorte, elementos COMBIN 14 de ANSYS, para introducir la rigidez del apoyo horizontal.

Para obtener más información de los elementos de ANSYS utilizados, se puede consultar el **ANEJO C: Método elementos finitos y ANSYS**

Todo el análisis se realiza por 1 metro de ancho de perfil. De forma que los valores de las cargas introducidas, así como otras variables necesarias estarán referenciadas a ese 1 metro de perfil.

Se realizará un análisis material elástico geoméricamente no lineal, introduciendo para ello una imperfección.

Las propiedades de la sección de los elementos barra son las propiedades eficaces indicadas en la Tabla 3.3. Todas las propiedades que en ella aparecen (t , A_{ef} , I_{eff} , W_{eff-} , W_{eff+} , PP) son necesarias para los cálculos a realizar. Además también serán necesarias:

$$f_y = 280 \text{ N/mm}^2 ; E = 210.000 \text{ N/mm}^2 ; \nu = 0,3 \quad y \quad \gamma_M = 1,0$$

Las características del cable elegido (elemento lineal) se resumen en la Tabla 3.4 y la Tabla 3.5. Las propiedades necesarias para realizar el estudio son las siguientes:

$$\varnothing_{cable} = 16 \text{ mm} ; A_{cable} = 111 \text{ mm}^2 ; E_{cable} = 100.000 \text{ N/mm}^2 \quad y \quad N_u = 133,42 \text{ kN}$$

Como la simulación se realiza por 1 metro de ancho de perfil y el cable se colocará cada 2,5 metros, el área del cable, A_{cable} , así como la tensión de rotura de éste, N_u , en la modelización se dividirá por los 2,5 metros

Las rigideces horizontales en apoyos para casos en que el cable no esté traccionado serán igual a las rigideces de los elementos resorte que se han especificado en el apartado 3.4 **CONDICIONES DE ENLACE:** $K=250$, $K=350$, $K=550$ y $K=750$ (N/mm cada m)

Las siguientes 2 figuras, Fig. 4.1 y Fig. 4.2, muestran el modelo de un arco de longitud 10 m y flecha 2m, para los casos de presión uniforme y succión uniforme.

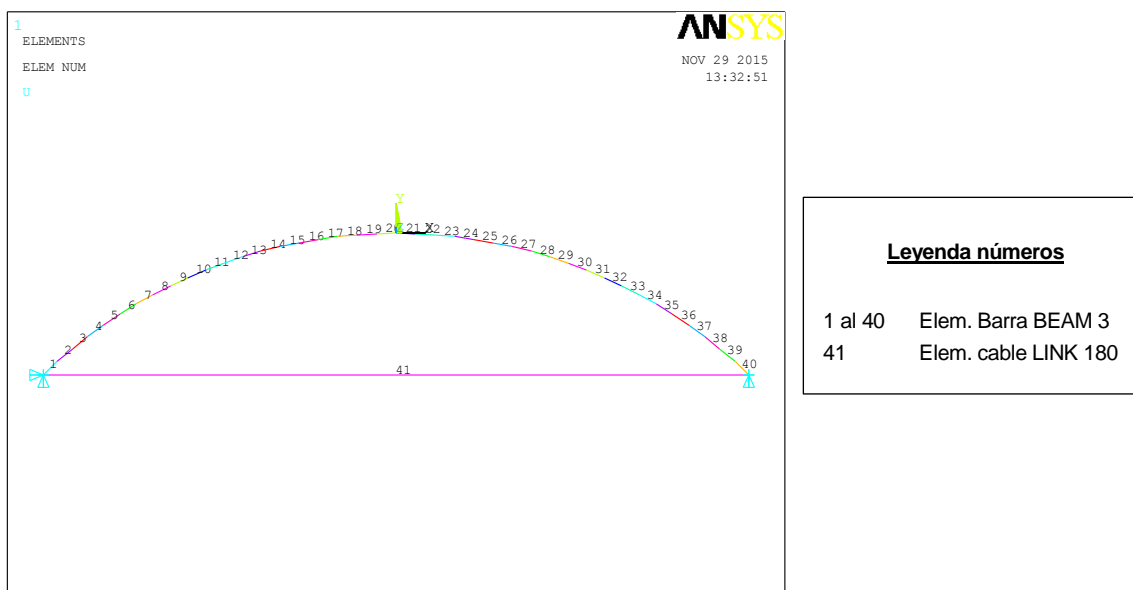


Fig. 4.1 Modelo 1 en ANSYS (Presión): numeración de elementos.

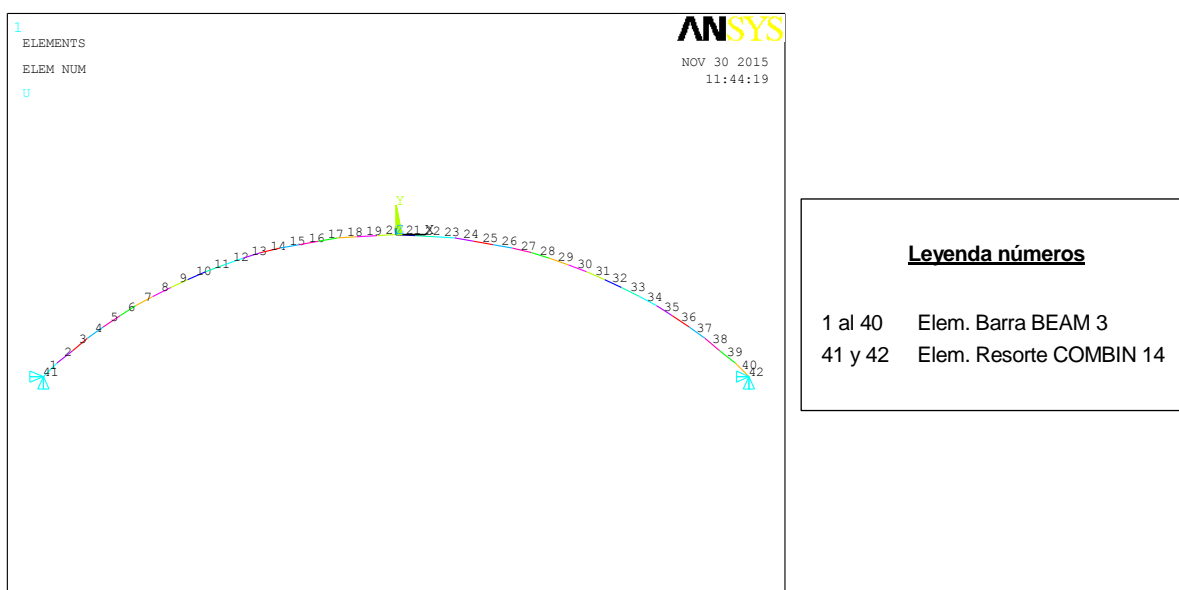


Fig. 4.2 Modelo 2 en ANSYS (Succión): numeración de elementos.

El análisis de los arcos se lleva a cabo en dos etapas. La primera etapa consiste en un análisis lineal de pandeo a partir del cual se determinan los cinco primeros modos propios de inestabilidad. De los cinco calculados, se almacena el de menor carga elástica (que será el primer modo de pandeo) Fig. 4.3, para ser utilizados en la segunda etapa.

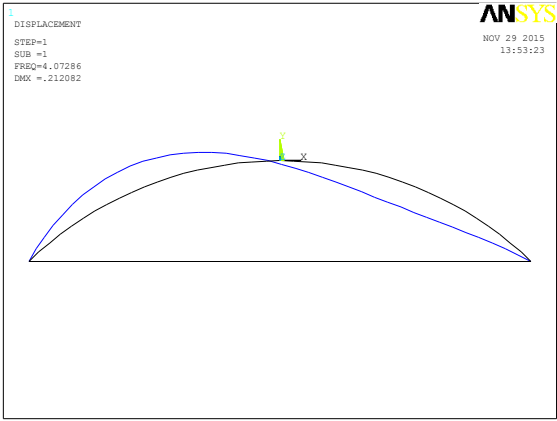


Fig. 4.3 Primer modo de inestabilidad o pandeo.

El primer paso de la segunda etapa es introducir una imperfección a la geometría inicial del arco. Se selecciona como forma de imperfección la que corresponde al primer modo de pandeo. El valor de su amplitud, (ver Fig. 4.4), se escoge igual a: $e_0=400/L$ tal y como se especifica para arcos en el *Eurocódigo 3 Parte 2* [7], (ver figura Fig. 4.5).

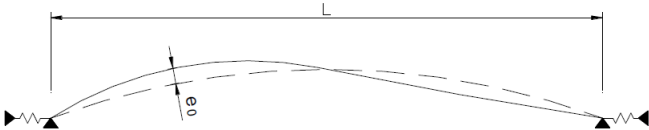


Fig. 4.4 Imperfecciones iniciales e_0 según el primer modo de inestabilidad.

		2 shape of imperfection (sinus or parabola)	3 e_0 according to classification of cross section to buckling curve			
			a	b	c	d
1			$\frac{s}{300}$	$\frac{s}{250}$	$\frac{s}{200}$	$\frac{s}{150}$
2			$\frac{\ell}{600}$	$\frac{\ell}{500}$	$\frac{\ell}{400}$	$\frac{\ell}{300}$

Fig. 4.5 Magnitud y forma de la imperfección a considerar en arcos [7].

A continuación, se lleva a cabo un análisis geométrico no lineal de material elástico, del arco. Este análisis se resuelve aplicando el método de Newton-Raphson completo, incremental e iterativo, con un mínimo de 20 pasos de carga.

Todo este proceso se realiza para las seis hipótesis de carga y para cada una de las parejas L-f (longitud-flecha) que aparecen en las tablas, para cada uno de los casos a estudiar de la hipótesis 6 y para cada K de las hipótesis 5 y 6, que son de succión.

4.1.1 Método de Newton-Raphson completo

Para resolver una estructura por el método lineal de cálculo es suficiente resolver un sistema de ecuaciones una sola vez. En cambio, si se quiere realizar un estudio no lineal, el cálculo es bastante más complejo.

La característica principal del método no lineal de cálculo es que tiene en cuenta que las cargas inicialmente aplicadas a la estructura tendrán un efecto diferente si se tiene en cuenta que la estructura se va deformando a la vez que nota el efecto de las cargas externas.

El procedimiento utilizado para ejecutar el cálculo no lineal en este proyecto será el método de Newton-Raphson completo. Este método es incremental e iterativo.

Se divide la carga total aplicada F^a que solicita a una estructura en n porciones ΔF_n (que no necesariamente han de ser iguales). Estas n fracciones de carga se aplican de manera incremental (porción a porción) hasta llegar a la carga total.

Para cada una de las fracciones de carga en que se discretiza la estructura, se realizan el número de iteraciones necesarias para que la diferencia entre la carga prefijada y la carga real converja (ver Fig. 4.6)

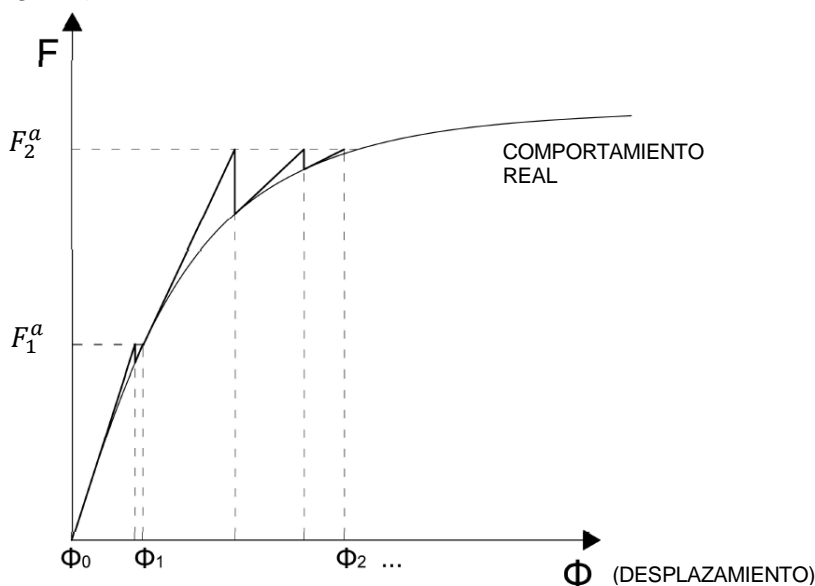


Fig. 4.6 Método Newton-Raphson completo

4.2 COMPROBACIONES EFECTUADAS

4.2.1 Verificación de los perfiles curvados

Se consideran los perfiles curvados como elementos sometidos a flexión y compresión, y como tales, según la *EAE Instrucción de Acero Estructural* [5] y el Eurocódigo 3, parte 1-1 [7] se deberán verificar las siguientes condiciones:

$$\frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1} N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\gamma_{M1} M_{z,Rk}} \leq 1 \quad (\text{Ec. 4.1})$$

$$\frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1} N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\gamma_{M1} M_{z,Rk}} \leq 1 \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Dónde:

$N_{Ed}, M_{y,Ed}, M_{z,Ed}$	Valores de cálculo del esfuerzo axial de compresión y de los momentos flectores máximos a lo largo del elemento alrededor de los ejes y-y y z-z respectivamente.
$\Delta M_{y,Ed}, \Delta M_{z,Ed}$	Momentos adicionales debidos al desplazamiento del centro de gravedad del área eficaz A_{eff} con respecto al centro de gravedad de la sección transversal bruta.
χ_y, χ_z	Coeficientes de reducción para pandeo por flexión.
χ_{LT}	Coeficiente de reducción para pandeo lateral (elementos no susceptibles a deformaciones por torsión $\chi_{LT}=1,0$).
$k_{yy}, k_{yz}, k_{zy}, k_{zz}$	Coeficientes de interacción.

Como el análisis que se realiza es un análisis geoméricamente no lineal, en el que se tienen en cuenta las imperfecciones geométricas, no será necesario emplear los factores de reducción para elementos sometidos a compresión, (χ_y, χ_z), ni los factores de interacción debido a la combinación de compresión y momento, ($k_{yy}, k_{yz}, k_{zy}, k_{zz}$).

No tendremos en cuenta la excentricidad, con lo que tampoco tendremos $\Delta M_{y,Ed}, \Delta M_{z,Ed}$

Además, como el cálculo se realiza en el plano, las dos ecuaciones anteriores se reducen a la siguiente:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{cz,Rd}} \leq 1 \quad (\text{Ec. 4.3})$$

dónde: N_{Ed} es el esfuerzo normal obtenido en los análisis.

$M_{z,Ed}$ es el momento flector.

$N_{c,Rd}$ es el esfuerzo normal resistente a compresión, calculado teniendo en cuenta el área eficaz de la sección

$M_{cz,Rd}$ es el momento resistente a flexión, calculado teniendo en cuenta el módulo resistente eficaz

Clase	1	2	3	4
A	A	A	A	A_{ef}
W_y	$W_{pl,y}$	$W_{pl,y}$	$W_{el,y}$	$W_{ef,y}$
W_z	$W_{pl,z}$	$W_{pl,z}$	$W_{el,z}$	$W_{ef,z}$
$\Delta M_{y,Ed}$	0	0	0	$e_{N,y} \cdot N_{Ed}$
$\Delta M_{z,Ed}$	0	0	0	$e_{N,z} \cdot N_{Ed}$

Tabla 4.1 Tabla 35.3.a de la EAE [5] Valores de $N_{Rk}=f_y A_i$, $M_{i,Rk}=f_y W_i$ y $\Delta M_{i,Ed}$

Como el perfil curvado de chapa de acero conformado en frío es de sección tipo 4, y teniendo en cuenta la Tabla 4.1, se tiene:

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (\text{Ec. 4.4})$$

$$M_{cz,Rd} = \frac{W_{eff} \cdot f_y}{\gamma_M} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

Dónde:

A_{eff} Es el área eficaz de la sección.

f_y Límite elástico del acero

γ_{M1} Coeficiente de seguridad de resistencia de elementos estructurales frente a inestabilidad para estados límite últimos. $\gamma_{M1}=1$

W_{eff} es el módulo resistente eficaz

La comprobación se realiza en las secciones de momento positivo máximo, momento negativo máximo y esfuerzo normal máximo.

En realidad, todo el procedimiento es iterativo. Se deben repetir los análisis hasta que la carga aplicada q_Q resulta con unos valores de N_{Ed} i $M_{z,Ed}$ que cumplen la expresión de verificación:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{cz,Rd}} \approx 1 \quad (\text{Ec. 4.6})$$

4.2.2 Verificación de los tirantes de cable

En los casos dónde el cable forma parte del modelo, se ha incluido la siguiente comprobación:

$$N_c < N_{u(m)} \quad (\text{Ec. 4.7})$$

Donde N_c es la carga calculada del cable por metro lineal de chapa y, $N_{u(m)}$ la Carga de rotura del tirante de cable por metro de chapa, calculada tal y como se explica en el **ANEJO A: Descripción del modelo y toma de decisiones**

Del Catálogo de Tirantes de la firma Cables Estructurales, se extrae N_u y consecuentemente $N_{u(m)}$ que se utilizará para la comprobación.

Cuando esto no se verifique, se anotará el resultado en un archivo de rotura de cable. De esta forma se tendrá controlado si en algún momento o situación no aguanta el cable. Y podrá sustituirse por otro.

4.2.3 Verificación de la flecha

Tal y como se describe en el apartado 3.5 *FLECHAS VERTICALES* de esta memoria, se decide calcular por duplicado los resultados de todas las situaciones de este proyecto, para una flecha máxima admisible de $L/150$ y para otra de $L/200$

Para ello, una vez calculada la q_Q que obtiene unos valores de N_{Ed} y $M_{z,Ed}$ que cumplen la expresión de verificación anterior (Ec. 4.6) se comprueban las flechas máximas admisibles de $L/150$ y de $L/200$.

Primero siendo $F_{adm} = L/150$ se calcula q_{ELS} de la carga q_Q calculada, (Siendo q_{ELS} la carga en el estado límite de servicio). Con esa q_{ELS} se mira la Flecha y se comprueba la (Ec. 3.2) mencionada en el capítulo 3:

$$\text{Flecha} < F_{adm} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Si no se cumple, se va bajando iterativamente q_{ELS} hasta que por fin se cumpla la ecuación anterior (Ec. 3.2)

Con la misma q_{ELS} anterior, se vuelve a mirar la Flecha y se realiza la misma comprobación (Ec. 3.2) pero ahora con $F_{adm} = L/200$

Se procede de la misma manera. Si no se cumple la expresión se va bajando iterativamente q_{ELS} hasta que por fin la cumpla.

De esta manera se obtienen 2 valores para q_{ELS} diferentes para cada carga q_Q calculada. En el caso que la flecha obtenida cumpla para $L/150$ y también para $L/200$ a la vez, se obtendrá un mismo valor para q_{ELS}

4.2.4 Datos calculados cumpliendo las verificaciones

Los valores que se calcularán mediante cálculos iterativos se presentarán en las tablas de capacidad del **ANEJO E: Tablas de capacidad de carga del perfil curvado H68**. Se realizarán diferentes tablas para cada una de las hipótesis estudiadas. En ellas aparecerán la carga q_Q para el estado último de servicio, q_{ELS} para una flecha máxima admisible de $L/150$, desplazamiento horizontal de los apoyos para una flecha máxima admisible de $L/150$, q_{ELS} para una flecha máxima admisible de $L/200$, desplazamiento horizontal de los apoyos para una flecha máxima admisible de $L/200$, en el caso de succión, las reacciones horizontales en los apoyos, y en los casos que en la simulación hay cable, el axil de éste.

4.3 ENSAYOS EXPERIMENTALES

Se ha de realizar ensayos experimentales que contrasten con los resultados obtenidos por medio de las simulaciones realizadas, con el fin de verificar toda la metodología y procedimientos presentados para el cálculo de los perfiles curvados. A día de hoy este contraste experimental está todavía pendiente de realizar.

4.4 RIGIDECES DE LOS SOPORTES DE LA CUBIERTA (caso succión)

Las rigideces que se han estudiado en los apoyos se pueden conseguir fácilmente con perfiles laminados convencionales.

Para calcular la rigidez se tendrá en cuenta la altura del soporte (H), la distancia entre soportes (s) y el tipo de perfil del soporte.

Se definen los soportes como barras empotradas en un extremo y libres en el otro extremo. Es decir, como vigas en voladizo con una carga puntual en el extremo opuesto al empotramiento.

El desplazamiento máximo (δ_{max}) será el que se expresa según en la ecuación (Ec. 4.8)

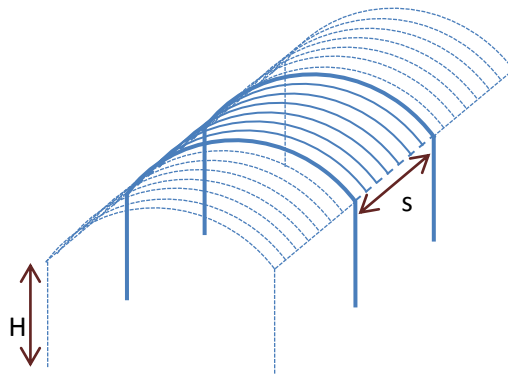
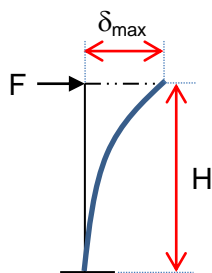


Fig. 4.7 Esquema de la estructura. Altura y separación de pilares



$$\delta_{max} = \frac{FH^3}{3EI} \quad (\text{Ec. 4.8})$$

Definimos la rigidez k como el cociente entre la fuerza perpendicular a una viga en voladizo, en el extremo y el desplazamiento máximo (δ_{max}) de ese extremo.

$$k = \frac{F}{\delta_{max}}$$

Entonces, teniendo en cuenta la (Ec. 4.8):

$$k = \frac{3EI}{L^3} \quad (\text{Ec. 4.9})$$

La rigidez K según la separación entre soportes será:

$$K = \frac{k}{s} \quad (\text{Ec. 4.10})$$

La Fig. 4.7 muestra el esquema de la estructura. En él se marca la altura y separación de pilares que se ha de tener en cuenta para el cálculo de la rigidez K .

A continuación, en la Tabla 4.2 se muestran las rigideces de soportes de perfil laminado tipo HEB según la separación entre pilares de 2 m a 7 m para el caso de altura de soporte de 5 m. Están marcados en azul los casos que tienen una $K > 250$.

Por ejemplo, para el caso de $K=250$, se podían poner soportes HEB-260 separados a 3 m o soportes HEB-300 separados a 5 m, o soportes HEB-320 separados a 6 m, o soportes HEB-340 separados a 7 m.

HEB	H = 5m			K	RIGIDEZ EN FUNCIÓN DE LA SEPARACIÓN ENTRE PILARES							
PERFIL	INERCIAS			RIGIDEZ HEB		s						
						2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	m
HEB-100	I =	4495400	mm ⁴	22,66	N/mm	11,33	7,55	5,66	4,53	3,78	3,24	N/mm/m
HEB-120	I =	8643700	mm ⁴	43,56	N/mm	21,78	14,52	10,89	8,71	7,26	6,22	N/mm/m
HEB-140	I =	15092300	mm ⁴	76,07	N/mm	38,03	25,36	19,02	15,21	12,68	10,87	N/mm/m
HEB-160	I =	24920000	mm ⁴	125,60	N/mm	62,80	41,87	31,40	25,12	20,93	17,94	N/mm/m
HEB-180	I =	38311300	mm ⁴	193,09	N/mm	96,54	64,36	48,27	38,62	32,18	27,58	N/mm/m
HEB-200	I =	56961700	mm ⁴	287,09	N/mm	143,54	95,70	71,77	57,42	47,85	41,01	N/mm/m
HEB-220	I =	80909600	mm ⁴	407,78	N/mm	203,89	135,93	101,95	81,56	67,96	58,25	N/mm/m
HEB-240	I =	112592900	mm ⁴	567,47	N/mm	283,73	189,16	141,87	113,49	94,58	81,07	N/mm/m
HEB-260	I =	149194100	mm ⁴	751,94	N/mm	375,97	250,65	187,98	150,39	125,32	107,42	N/mm/m
HEB-280	I =	192702500	mm ⁴	971,22	N/mm	485,61	323,74	242,81	194,24	161,87	138,75	N/mm/m
HEB-300	I =	251656500	mm ⁴	1268,35	N/mm	634,17	422,78	317,09	253,67	211,39	181,19	N/mm/m
HEB-320	I =	308235100	mm ⁴	1553,50	N/mm	776,75	517,83	388,38	310,70	258,92	221,93	N/mm/m
HEB-340	I =	366563600	mm ⁴	1847,48	N/mm	923,74	615,83	461,87	369,50	307,91	263,93	N/mm/m
HEB-360	I =	431934200	mm ⁴	2176,95	N/mm	1088,47	725,65	544,24	435,39	362,82	310,99	N/mm/m
HEB-400	I =	576804800	mm ⁴	2907,10	N/mm	1453,55	969,03	726,77	581,42	484,52	415,30	N/mm/m
HEB-450	I =	798875200	mm ⁴	4026,33	N/mm	2013,17	1342,11	1006,58	805,27	671,06	575,19	N/mm/m
HEB-500	I =	1071757300	mm ⁴	5401,66	N/mm	2700,83	1800,55	1350,41	1080,33	900,28	771,67	N/mm/m
HEB-550	I =	1366908100	mm ⁴	6889,22	N/mm	3444,61	2296,41	1722,30	1377,84	1148,20	984,17	N/mm/m
HEB-600	I =	1710410400	mm ⁴	8620,47	N/mm	4310,23	2873,49	2155,12	1724,09	1436,74	1231,50	N/mm/m

Tabla 4.2 K de soportes de perfiles HEB para separaciones entre 2 y 7 m.

Se confeccionará una tabla para cada tipo de perfil del soporte (en este proyecto se evalúan los tipos IPE, HEA y HEB) y cada altura posible del pilar (en este proyecto se tomara el rango de alturas de $H=3\text{m}$ hasta $H=8\text{m}$ de $0,5\text{m}$ en $0,5\text{m}$). Con lo que se obtienen 33 tablas diferentes de rigideces de los soportes en función de la separación entre éstos. Todas estas tablas se recogen en el **ANEJO B: hojas de cálculo**. Para ver cualquiera de ellas consultar dicho anejo.

5 MACROS ANSYS

Tal y como se ha comentado anteriormente, el cálculo de los esfuerzos en las secciones del arco se lleva a cabo mediante el método de los elementos finitos, con el programa comercial ANSYS. Se han utilizado las versiones de ANSYS 14.0 y 15.0 ya que se ha trabajado con dos ordenadores diferentes.

En este capítulo se describe qué son y en qué consisten las Macros o ficheros Script utilizados para realizar las simulaciones de este proyecto. Se explica que antes de la implementación de la Macro se ha de realizar un estudio y una estructura a seguir, para facilitar su programación. Se enumeran los elementos utilizados en la simulación y se especifican las etapas a seguir para obtener una solución mediante ANSYS.

Para más información sobre los ficheros Script o Macros de Ansys ver el **ANEJO C: Método elementos finitos y ANSYS** y el **ANEJO D: Macros Ansys**.

5.1 DESCRIPCIÓN DE MACRO DE ANSYS

Para poder llegar a los resultados obtenidos en este proyecto se han desarrollado diferentes macros para los diferentes casos estudiados.

Cada caso se ha estructurado con una macro principal y varias secundarias a las que llama la principal.

Los ficheros de Macros de ANSYS se llaman ficheros de lenguaje APDL, lenguaje Paramétrico de diseño de ANSYS (ANSYS Parametric Design Language)

Al programa ANSYS se le pueden introducir las órdenes mediante la Interfaz del programa (por medio de los menús: Menú Principal y Menú utilitario), por la línea de comandos (por medio de lenguaje APDL) o bien por la introducción de una Macro.

Una Macro de ANSYS no es más que las órdenes que se le han de dar a ANSYS para que realice un cálculo y nos extraiga unos resultados, escritas en un fichero de texto (Script).

A la hora de realizar el estudio para las cubiertas curvadas autoportantes son muy útiles e imprescindibles estos ficheros Macro ya que en ellos especificamos procesos iterativos y dentro de esos procesos iterativos llamamos a su vez a otros procesos también iterativos. En nuestro caso se hacen los cálculos iterativos para una longitud inicial y una flecha inicial del arco. Estos cálculos van iterando hasta que se obtiene un resultado que cumpla con la condición o

condiciones impuestas. Dicho resultado entra en otros procesos iterativos hasta que se obtiene el resultado (en nuestro caso una matriz de resultados). Cuando se ha obtenido el primer resultado, aumenta incrementalmente la flecha y va calculando los resultados con la longitud inicial y cada una de las flechas a estudiar. Luego, aumenta también incrementalmente la longitud, realizando los cálculos para cada una de las longitudes y para cada una de las flechas a estudiar.

```

fini
/clear

/prep7

!Espesor chapa 1.2mm

l=13500
f=1600
h=68
aef=262.97
inef=438758.64
wpos=27284.25
wneg=11956.18
pp=0.135466023*1.35
fy=280

!Características cable

fyc=1427
Ac=111/2.5
Nu=66710/2.5

!Chapa

et,1,3
r,1,aef,inef,h
mp,ex,1,210000
MP,NUXY,1,0.3

!Cable

et,2,link180,0,0,1
r,2,Ac,lc
mp,ex,2,100000
mp,nuxy,2,0.3

*dim,matriz,array,13,1,1
*dim,matriz2,array,13,1,1
*dim,matriz3,array,13,1,1
*do,long,1,2,1
*do,fl,1,8,1

edele,all
ndele,all
numcomp,all

q=1
r=(l**2+4*f**2)/(8*f)

```

Fig. 5.1 Parte inicial de la Macro principal de Presión Uniforme con lenguaje APDL

La realización de estos procesos de cálculo no sería posible sin la ayuda de las Macros. Las cuales especifican lo que se ha de ejecutar en cada momento, desde la creación del modelo, la introducción de imperfecciones en el modelo, la asignación de cargas, la resolución por medio de métodos no lineales, la verificación de las condiciones de tensión, desplazamientos y flecha máximos que se le imponen, y la extracción de las soluciones; ya sean estas por medio de valores o por medio de gráficos o diagramas.

En la figura anterior, Fig. 5.1, Se muestra la parte inicial de una Macro principal. En este caso se trata de la Macro principal de Presión Uniforme.

El **ANEJO D: Macros Ansys**, contiene Macros principales utilizadas y también Macros secundarias.

5.2 DISEÑO Y ESTRUCTURA DE LAS MACROS UTILIZADAS.

Antes de empezar a escribir una Macro es conveniente realizar un estudio preliminar. En él se decidirán las características generales de la simulación y la estructura que tendrán el archivo o archivos de programación, es decir la estructura de la Macro.

Lo primero de todo es establecer que es lo que se quiere modelar y con qué elementos se realizará el estudio (es decir, definir el modelo geométrico).

Después se hace un diseño de la estructura de la Macro. Este diseño contiene a grandes rasgos lo que pretendemos que haga la Macro. En él se especifican las condiciones que se quieren que se cumplan y en el orden que se desea que se efectúen. Por ejemplo: cuál será la tensión máxima que se quiere que cumpla, cuál será el desplazamiento máximo permitido en los extremos del arco o la deformación máxima de flecha que se desea que cumpla.

Además, es conveniente establecer también en el diseño lo que se desea que aparezca en los archivos de resultados. Como ya se verá más adelante tendremos varios archivos de resultados. Unos archivos serán el de resultado final, el resultado propiamente que buscamos y otros serán auxiliares para verificar y poder ir siguiendo las iteraciones que efectúa la Macro. También como resultado se tomarán imágenes como por ejemplo diagramas de momentos, cortantes y axiles.

El diseño contendrá entonces todo lo necesario para luego poder escribir el archivo en lenguaje APDL siguiendo las pautas de este diseño, facilitando así su escritura.

Por último después de tener el modelo geométrico definido y el diseño de la estructura especificada, se definirán los casos o hipótesis que se pretenden estudiar.

En nuestro caso el diseño inicial de la Macro difiere un poco del diseño final. En un inicio se quería que la chapa cumpliera con una deformación de flecha máxima de $L/200$ pero después se determinó que los resultados satisficieran una deformación máxima de flecha de $L/150$ y que también salieran otros resultados satisfaciendo la flecha máxima de $L/200$.

5.2.1 Diseño de la macro

Las Macros que se utilizan para hacer el estudio de capacidad de las chapas de acero conformadas en frío y curvadas, para cada una de las hipótesis y para cada caso seguirán todas el mismo diseño.

Constarán de una Macro principal y unas secundarias. Las secundarias son llamadas por la Macro principal. Así que la macro secundaria actúa en un punto concreto de la macro principal, en el momento que se necesiten. También una secundaria puede actuar dentro de otra secundaria en el momento que se requiera.

Las secundarias podrán ser:

- Iterativas (ejecutan iteraciones para obtener un resultado)
- Listados (listaran o guardarán resultados en un fichero)

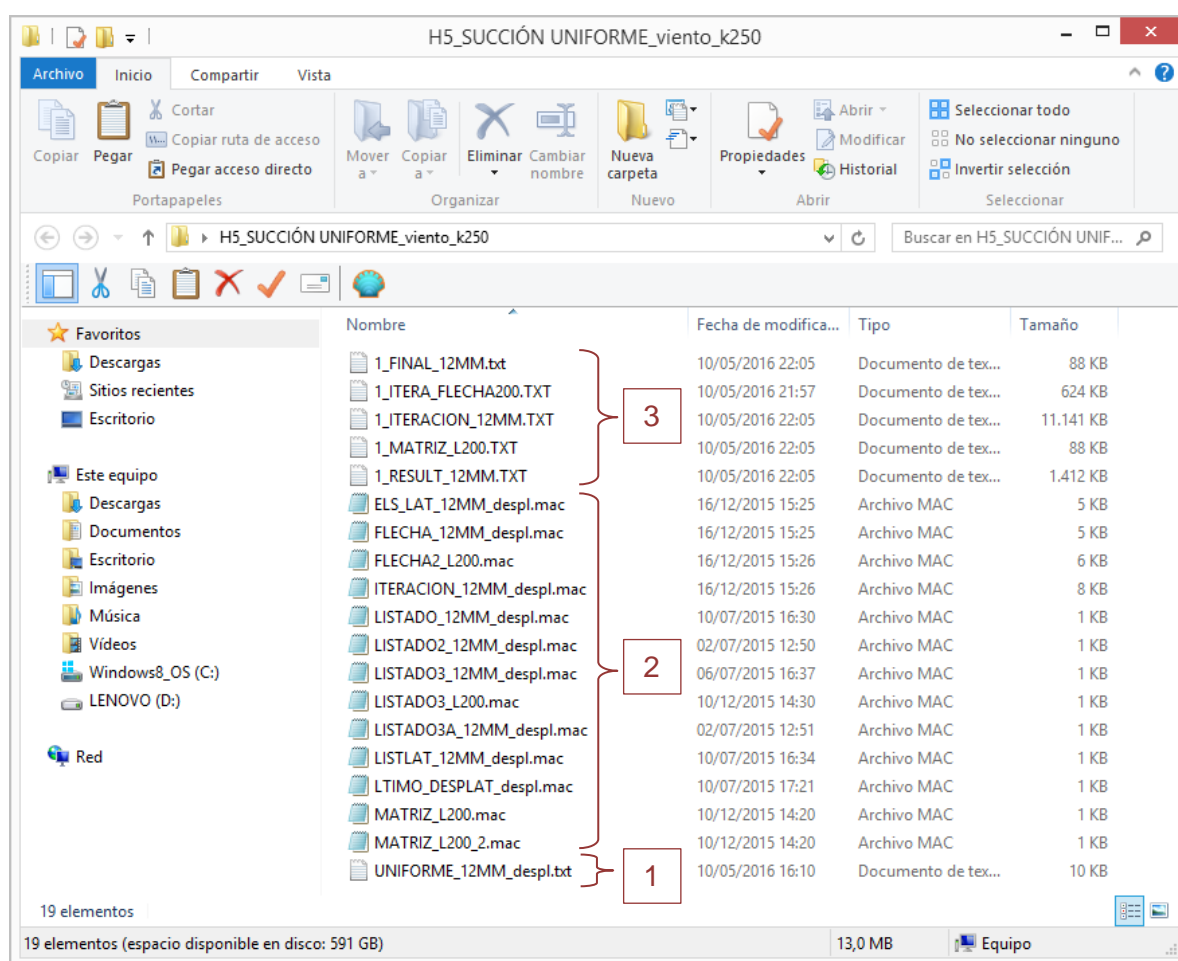
Cada Macro, ya sea principal o secundaria se escribirá en un archivo. Al conjunto de estos es al que le llamaremos en sí Macro. Para ver el código de estos archivos, tanto de las principales como de las secundarias, ver *el ANEJO D: Macros ANSYS*.

5.3 MACRO PRINCIPAL: ESTRUCTURA Y ÓRDENES UTILIZADAS

En el *ANEJO C: Método elementos finitos y ANSYS* se puede encontrar especificada la estructura que se seguirá a la hora de escribir las Macros de las diferentes hipótesis de carga. También se encuentra los comentarios y la explicación de todas y cada una las líneas de código de una Macro principal. Estas las líneas de código son las órdenes utilizadas con lenguaje APDL. En concreto está explicada la Macro principal para presión uniforme.

5.4 ARCHIVOS O FICHEROS DE LAS MACRO UTILIZADAS

En la figura siguiente, Fig. 5.2, se muestran los ficheros o archivos de una Macro para una hipótesis de succión. Se puede observar que existe un fichero principal y 13 archivos secundarios. Los 5 archivos que empiezan por 1_ son los archivos de salida. Éstos se van escribiendo a la par que ANSYS va calculando la simulación. En ellos se registran los datos que se estiman oportunos para hacer un seguimiento de las diferentes variables que se van calculando y las verificaciones que se van ejecutando.



- 1 Archivo de Macro principal.
- 2 Archivos de Macros secundarias.
- 3 Archivos de salida, una vez ejecutada la Macro.

Fig. 5.2 Ficheros de una Macro

5.5 ELEMENTOS DE ANSYS UTILIZADOS

Para la realización de las simulaciones en ANSYS se han utilizado los siguientes tipos de elementos:

- Beam3 (Arco de chapa)
- Link180 (Cable)
- Combin14 (muelle)

En el **ANEJO C: Método elementos finitos y ANSYS** se especifican las características de cada elemento, así como sus datos de entrada y de salida.

5.6 CÁLCULO CON ANSYS

Para obtener una solución mediante ANSYS por medio de elementos finitos se han de realizar las siguientes 3 etapas.

a) Preprocesador: Construcción del modelo.

- Se definen los keypoints/líneas/áreas/volúmenes.
- Se definen los tipos de elementos, material y propiedades.
- Se Mallan las líneas/áreas/volúmenes.

b) Solución: Se soluciona el modelo.

- Se asignan cargas.
- Se asignan las restricciones o condiciones de contorno.
- Se resuelve

c) Postprocesador: Se visualizan los resultados.

- Mediante listados (por ejemplo los desplazamientos en nodos, elementos, fuerzas y momentos).
- Mediante gráficos (Se dibujan la geometría deformada).
- Mediante diagramas (Se dibujan los diagramas de tensiones).

En las Macros que se utilizan en este proyecto se especifican la construcción del modelo, su solución y también se especifican todos los datos resultantes de la solución, que se desean tener almacenados en archivos de salida.

6 GENERACIÓN DE TABLAS PARA EL DISEÑO

En este capítulo se explica brevemente cuales son y en qué forma se obtienen los resultados de los análisis ejecutados mediante las Macros realizadas en ANSYS y cómo una vez obtenidos éstos se tratan hasta obtener las tablas deseadas. Si se desea ver en más detalle ver el **ANEJO B: Hojas de cálculo**

En los tres últimos subapartados se muestran las tablas de diseño de para el caso de presión uniforme, para un caso de succión uniforme con $K=250$ y para un caso de succión no uniforme con $K=250$ (caso marquesina).

Se han realizado diferentes tablas de capacidad o para el diseño del perfil H68. Para ver todas y cada una de ellas así como los valores que éstas contienen ver el **ANEJO E: Tablas de capacidad de carga del perfil curvado H68**

6.1 ARCHIVOS DE SALIDA DE ANSYS

Una vez se ha diseñado un Script o Macro de Ansys se ejecutará, indicándole en el cuerpo de archivo los parámetros de Longitud y Flecha del arco o de los arcos de los cuales se desean estudiar. Para más información sobre los ficheros Script o Macros de Ansys ver el **ANEJO D: Macros Ansys**.

De la forma que han sido diseñados, mientras se van ejecutando, se van escribiendo los resultados en unos archivos de salida. Estos ficheros de salida son ficheros de texto con la extensión “.txt”

Por cada hipótesis calculada se generan 2 ficheros principales de salida con los resultados calculados. Los ficheros tienen el nombre “1_FINAL_12MM.TXT” y “1_MATRIZ_L200.TXT”. En el primero se almacenan los datos que cumplen cada caso con una flecha admisible máxima de $L/150$ y en el segundo se almacenan los resultados de los mismos casos que en el primero pero cuando se cumplen con una flecha máxima admisible de $L/200$ (siendo L la longitud del arco).

Tal y como se han diseñado las Macros de Ansys primero se ejecutan los cálculos para el primer caso de Longitud y flecha determinados referentes a una flecha admisible máxima de $L/150$ y luego se ejecutan los referentes a una máxima de $L/200$. Después pasará al caso con Longitud y flecha siguientes y se procederá de igual modo hasta el último caso a calcular.

6.2 DATOS DE LOS FICHEROS DE SALIDA.

En el caso de estudiar una hipótesis de presión (utilizando el modelo con cable), los datos que se guardan en los ficheros principales de texto plano son:

- L Longitud del arco que describe la chapa
- f Flecha del arco que describe la chapa
- q_{ul} Carga en el estado límite último
- $N1_{ul}$ Esfuerzo normal en el extremo derecho del arco
- N_{ul} Esfuerzo normal en el extremo izquierdo del arco
- N_c Esfuerzo calculado del cable por metro lineal de chapa
- Rx_{ul} Reacciones horizontales en los apoyos
- q_{els} Carga en el estado límite servicio
- F_{adm} Flecha admisible
- Flecha Flecha máxima de la chapa
- $despl2$ Desplazamiento en el extremo derecho del arco
- N_{cels} Carga calculada del cable por metro lineal de chapa en el estado límite de servicio

En el caso de estudiar una hipótesis de succión (utilizando el modelo con muelles), los datos que se guardan en los ficheros principales son:

- L Longitud del arco que describe la chapa
- f Flecha del arco que describe la chapa
- q_{ul} Carga en el estado límite último
- N_{ul} Esfuerzo normal en el extremo izquierdo del arco
- $N1_{ul}$ Esfuerzo normal en el extremo derecho del arco
- Rx_{ul} Reacción horizontal en el apoyo izquierdo
- $Rx1_{ul}$ Reacción horizontal en el apoyo derecho
- q_{els} Carga en el estado límite servicio
- F_{adm} Flecha admisible
- Flecha Flecha máxima de la chapa
- $despl$ Desplazamiento en el extremo izquierdo del arco
- $despl2$ Desplazamiento en el extremo derecho del arco

Y la forma en que se presentan es la siguiente:

PARAMETER STATUS- MATRIZ3 (74 PARAMETERS DEFINED)
(INCLUDING 3 INTERNAL PARAMETERS)

LOCATION			VALUE
1	1	1	9000.00000
2	1	1	1000.00000
3	1	1	3.17900000
4	1	1	25268.8711
5	1	1	25239.7832
6	1	1	-21407.4740
7	1	1	21407.4618
8	1	1	0.00000000
9	1	1	0.65633333
10	1	1	45.0000000
11	1	1	42.8822120
12	1	1	12.1143979
13	1	1	-12.1143965

Tabla 6.1 Fragmento de fichero de resultados

La tabla anterior es un Fragmento de fichero de resultados, que contiene los resultados de un análisis para una hipótesis de succión.

Tal y como se muestra en la Tabla 3.1 cuando se hace un estudio para determinar la capacidad de carga del perfil de una cierta hipótesis, se ejecutan 121 análisis (si las longitudes varían de 9000 a 14000 mm, con incrementos de 500 mm en 500 mm y las flechas varían de 1000 a 3000 mm, con incrementos de 200 mm en 200 mm).

En el supuesto anterior, si se ejecutan los 121 análisis, los ficheros principales de resultados "1_FINAL_12MM.TXT" y "1_MATRIZ_L200.TXT" contienen cada uno 2.178 líneas de texto plano respectivamente. Estos datos se pasan a una hoja de cálculo.

6.3 FORMATO DE LAS TABLAS DE CAPACIDAD

Dentro de la hoja de cálculo ya se pueden estudiar los datos. El primer paso será agrupar los valores de cada variable en tablas diferentes. De esta forma se tienen ya juntos los valores de la misma variable y no todas las variables juntas como ocurre en un inicio.

Los datos que necesita ANSYS no tienen unidades específicas lo único que se debe de cumplir es que dichas unidades sean coherentes. Los datos que se introducen mediante las Macros son en N y mm, y los datos de salida están consecuentemente en las mismas unidades. Pero las unidades de los datos que se desean en las tablas pueden ser otras. Éste es el caso de las cargas que se desean en daN/m^2 ($\approx \text{kp/m}^2$).

Al estar dentro de una hoja de cálculo, los valores de estas tablas se pueden operar, para que concuerden con las unidades que deseamos que tenga cada variable o bien para obtener el resultado deseado. Por ejemplo para obtener el valor de la q en el estado límite último, q_{ul} se dividirá por 1,5 que es el coeficiente por el que va multiplicada.

Los resultados de salida en Ansys y los que deseamos para poner en las tablas de capacidad, tienen las unidades que se muestran en la Tabla 6.2.

Además, tal y como se ve en cualquiera de las tablas de diseño, las flechas de los arcos, de las tablas, varían de 100 en 100 mm en vez de 200 en 200 mm que son los calculados realmente. Así que se interpolará entre 2 resultados de Ansys para sacar el resultado intermedio.

Una vez obtenidos los valores en la forma deseada se generarán las tablas de capacidad marcando si es necesario en ellas todo lo que se considere relevante.

		UNIDADES	
VARIABLES		EN ANSYS	DESEADAS EN TABLAS
VARIABLES EN ARCHIVOS DE SALIDA ANSYS	L	mm	mm
	f	mm	mm
	q_{ul} (repartida)	N/mm cada m de chapa	daN/m cada m de chapa
	q_{ul} (puntual)	N cada m de chapa	daN cada m de chapa
	N_{ul}	N cada m de chapa	daN cada m de chapa
	$N1_{ul}$	N cada m de chapa	daN cada m de chapa
	N_c	N cada m de chapa	daN cada m de chapa
	Rx_{ul}	N cada m de chapa	daN cada m de chapa
	$Rx1_{ul}$	N cada m de chapa	daN cada m de chapa
	q_{els} (repartida)	N/mm cada m de chapa	N/mm cada m de chapa
	q_{els} (puntual)	N cada m de chapa	daN cada m de chapa
	F_{adm}	mm	mm
	Flecha	mm	mm
	despl	mm	mm
	despl2	mm	mm
	N_{cels}	N cada m de chapa	daN cada m de chapa

Tabla 6.2 Unidades de las variables de resultados de Ansys y unidades deseadas

Las tablas de capacidad se realizarán para las siguientes variables; q_{ul} , $Rx1_{ul}$, N_c , q_{els} (Para flecha máxima L/150), q_{els} (Para flecha máxima L/200), $despl$ (Para flecha máxima L/150), $despl$ (Para flecha máxima L/200).

Éstas serán agrupadas en 3 grupos que corresponderán con:

- Estado límite último (ELU)
- Estado Límite de Servicio para Flecha máxima de L/150 (ELS F_{adm} L/150)
- Estado Límite de Servicio para Flecha máxima de L/200 (ELS F_{adm} L/200)

Todas las tablas de valores finales que se han realizado llevan identificados en columnas el valor de la flecha y en las filas el valor de la longitud. (Ver siguientes las tablas)

6.4 TABLAS DE CAPACIDAD PARA LA HIPÓTESIS DE PRESIÓN UNIFORME

A continuación se muestran las tablas de capacidad para el diseño de 3 casos. Las tablas de cada caso están agrupadas en tres grupos, tal y como se ha explicado en el subapartado anterior. Y cada grupo está en una hoja diferente.

De las siguientes tablas que se presentan, las que se encuentran en las 3 primeras hojas corresponden a las tablas de capacidad o tablas para el diseño de la hipótesis de presión uniforme.

6.5 TABLAS DE CAPACIDAD PARA LA HIPÓTESIS DE SUCCIÓN UNIFORME K=250

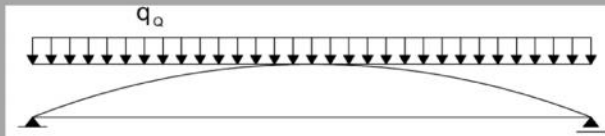
De las siguientes tablas que se presentan, las que se encuentran en las 3 hojas del medio corresponden a las tablas de capacidad o tablas para el diseño de la hipótesis de succión uniforme con una K=250 (viento frontal).

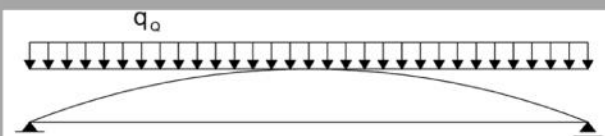
6.6 TABLAS DE CAPACIDAD PARA LA HIPÓTESIS DE SUCCIÓN NO UNIFORME K=250 (CASO MARQUESINA)


De las siguientes tablas que se presentan, las que se encuentran en las 3 últimas hojas corresponden a las tablas de capacidad o tablas para el diseño de la hipótesis de succión no uniforme con una K=250 (viento lateral), para el caso de marquesina.

ESTADO LÍMITE DE SERVICIO

FLECHA MÁXIMA L/150

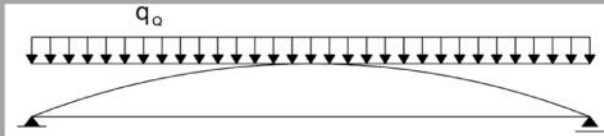
CHAPA H68		CARGA GRAVITATORIA UNIFORME (PRESIÓN UNIFORME)																				
		q (daN/m²) E.L.S. (ESTADO LÍMITE DE SERVICIO) L/150																				
Espesor=1.2 mm		f (mm)																				
		1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000
L (mm)	9000	113	137	160	183	207	213	220	220	220	217	213	207	200	197	193	187	180	173	167	160	153
	9500	93	114	135	153	172	179	187	190	193	193	193	190	187	180	173	170	167	160	153	147	140
	10000	75	92	108	127	145	153	160	163	167	167	167	167	167	163	160	157	153	150	147	140	133
	10500	65	78	90	106	122	129	137	142	147	148	150	148	147	147	147	143	140	137	133	130	127
	11000	54	66	77	89	102	109	117	122	127	128	130	132	133	133	133	130	127	127	127	123	120
	11500	41	51	62	73	85	92	100	103	107	110	113	115	117	118	120	118	117	115	113	110	107
	12000	35	44	53	62	71	78	86	90	93	97	100	102	103	103	103	105	107	105	103	102	100
	12500	31	37	43	51	58	66	73	76	80	83	87	88	90	92	93	93	93	93	93	93	93
	13000	23	29	34	41	48	55	62	65	69	71	73	76	79	81	82	83	83	83	83	83	83
	13500	17	24	31	35	40	46	52	56	59	61	63	66	69	70	72	73	73	74	76	76	76
14000	-	-	25	29	33	39	44	47	50	53	55	57	60	61	63	64	66	66	67	67	67	
(*) Para realizar un dimensionamiento se compararán los resultados de esta tabla con la carga a soportar sin mayorar. Los coeficientes de seguridad ya se han contemplado internamente en los cálculos.																						
(*) Es recomendable emplear una limitación de flecha de L/200 para realizar el dimensionamiento.																						

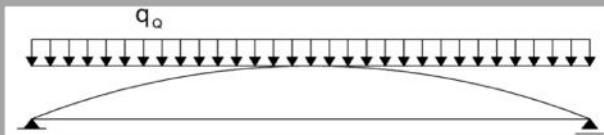
CHAPA H68		CARGA GRAVITATORIA UNIFORME (PRESIÓN UNIFORME)																				
		Desplazamiento horizontal total suma de ambos apoyos (mm) E.L.S. L/150																				
Espesor=1.2 mm		f (mm)																				
		1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000
L (mm)	9000	26,42	28,29	30,16	31,44	32,71	31,39	30,1	28,3	26,5	24,7	22,9	21,2	19,5	18,3	17,1	15,9	14,7	13,6	12,6	11,7	10,8
	9500	26,24	28,35	30,46	31,45	32,43	31,42	30,4	29,1	27,7	26,2	24,7	23,2	21,6	19,9	18,3	17,2	16,2	15,0	13,8	12,8	11,8
	10000	25,38	27,27	29,16	30,81	32,47	31,65	30,8	29,5	28,2	26,7	25,2	24,0	22,8	21,3	19,9	18,8	17,6	16,6	15,6	14,4	13,2
	10500	26,19	27,46	28,73	30,42	32,12	31,54	31,0	30,1	29,2	27,9	26,6	25,0	23,5	22,5	21,4	20,1	18,8	17,7	16,6	15,6	14,7
	11000	26,08	27,52	28,96	30,24	31,51	31,22	30,9	30,2	29,4	28,2	26,9	25,9	24,9	23,8	22,7	21,2	19,8	19,1	18,3	17,2	16,2
	11500	23,87	25,68	27,48	29,10	30,72	30,81	30,9	29,9	28,9	28,1	27,2	26,3	25,3	24,4	23,6	22,4	21,1	20,1	19,0	17,9	16,7
	12000	24,25	26,06	27,86	28,91	29,96	30,36	30,8	30,0	29,2	28,5	27,8	26,8	25,8	24,7	23,5	22,9	22,2	21,1	20,0	19,0	18,0
	12500	25,11	25,78	26,45	27,69	28,92	29,60	30,3	29,6	29,0	28,3	27,7	26,8	25,9	25,2	24,4	23,4	22,4	21,6	20,7	20,0	19,2
	13000	23,40	24,27	25,15	26,59	28,02	28,92	29,8	29,3	28,7	27,9	27,1	26,7	26,2	25,5	24,7	23,8	22,9	22,0	21,2	20,4	19,7
	13500	21,53	24,12	26,71	26,81	26,92	28,04	29,2	28,8	28,4	27,6	26,9	26,5	26,0	25,4	24,8	24,0	23,1	22,5	21,9	21,2	20,4
	14000	-	-	25,62	25,94	26,27	27,43	28,6	28,2	27,7	27,3	26,9	26,4	25,9	25,3	24,7	24,1	23,5	22,8	22,0	21,3	20,5
(*) Desplazamiento total horizontal en servicio en apoyos. El desplazamiento es relativo a la sobrecarga de servicio. Los coeficientes de seguridad ya se han contemplado internamente en los cálculos.																						
(*) Es recomendable emplear una limitación de flecha de L/200 para realizar el dimensionamiento.																						




ESTADO LÍMITE DE SERVICIO

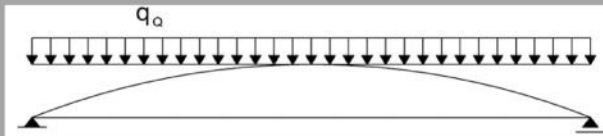
FLECHA MÁXIMA L/200

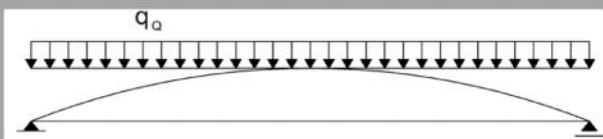
CHAPA H68		CARGA GRAVITATORIA UNIFORME (PRESIÓN UNIFORME)																				
		q (daN/m²) E.L.S. (ESTADO LÍMITE DE SERVICIO) L/200																				
Espesor=1.2 mm		f (mm)																				
L (mm)	9000	83	102	120	138	157	176	195	208	220	217	213	207	200	197	193	187	180	173	167	160	153
	9500	68	84	100	116	132	147	162	175	188	191	193	190	187	180	173	170	167	160	153	147	140
	10000	55	69	83	97	110	123	135	146	157	162	167	167	167	163	160	157	153	150	147	140	133
	10500	45	58	70	81	92	104	117	127	137	143	150	148	147	147	147	143	140	137	133	130	127
	11000	39	48	57	67	77	87	97	107	117	123	130	132	133	133	133	130	127	127	127	123	120
	11500	31	39	47	56	65	72	80	88	97	102	108	112	117	118	120	118	117	115	113	110	107
	12000	25	32	38	47	56	63	71	77	83	89	95	99	103	103	103	105	107	105	103	102	100
	12500	21	27	33	38	43	51	58	64	70	76	82	86	90	92	93	93	93	93	93	93	93
	13000	13	19	24	31	38	43	47	53	59	64	68	74	79	81	82	83	83	83	83	83	83
	13500	12	17	21	25	30	36	42	46	49	54	58	63	69	70	72	73	73	74	76	76	76
14000	-	-	15	21	28	31	34	40	45	48	50	52	55	59	63	64	66	66	67	67	67	
(*) Para realizar un dimensionamiento se compararán los resultados de esta tabla con la carga a soportar sin mayorar. Los coeficientes de seguridad ya se han contemplado internamente en los cálculos.																						


CHAPA H68		CARGA GRAVITATORIA UNIFORME (PRESIÓN UNIFORME)																				
		Desplazamiento horizontal total suma de ambos apoyos (mm) E.L.S. L/200																				
Espesor=1.2 mm		f (mm)																				
L (mm)	9000	19,87	21,40	22,92	23,97	25,03	25,89	26,8	26,6	26,5	24,7	22,9	21,2	19,5	18,3	17,1	15,9	14,7	13,6	12,6	11,7	10,8
	9500	19,80	21,39	22,98	24,08	25,18	25,84	26,5	26,8	27,0	25,9	24,7	23,2	21,6	19,9	18,3	17,2	16,2	15,0	13,8	12,8	11,8
	10000	19,36	21,14	22,92	23,97	25,03	25,65	26,3	26,4	26,6	25,9	25,2	24,0	22,8	21,3	19,9	18,8	17,6	16,6	15,6	14,4	13,2
	10500	19,18	21,05	22,93	23,82	24,72	25,71	26,7	27,0	27,3	26,9	26,6	25,0	23,5	22,5	21,4	20,1	18,8	17,7	16,6	15,6	14,7
	11000	19,98	21,13	22,27	23,34	24,41	25,21	26,0	26,6	27,3	27,1	26,9	25,9	24,9	23,8	22,7	21,2	19,8	19,1	18,3	17,2	16,2
	11500	19,24	20,50	21,75	22,98	24,22	24,75	25,3	25,8	26,4	26,3	26,1	25,7	25,3	24,4	23,6	22,4	21,1	20,1	19,0	17,9	16,7
	12000	18,96	20,14	21,32	22,86	24,40	25,17	25,9	26,2	26,4	26,5	26,5	26,2	25,8	24,7	23,5	22,9	22,2	21,1	20,0	19,0	18,0
	12500	19,07	20,29	21,51	22,08	22,65	23,74	24,8	25,3	25,8	26,0	26,3	26,1	25,9	25,2	24,4	23,4	22,4	21,6	20,7	20,0	19,2
	13000	16,68	18,15	19,62	21,46	23,30	23,50	23,7	24,4	25,2	25,3	25,5	25,9	26,2	25,5	24,7	23,8	22,9	22,0	21,2	20,4	19,7
	13500	17,76	19,10	20,45	21,05	21,65	23,11	24,6	24,5	24,3	24,7	25,1	25,6	26,0	25,4	24,8	24,0	23,1	22,5	21,9	21,2	20,4
14000	-	-	18,66	20,98	23,31	23,39	23,5	24,5	25,5	25,2	24,9	24,5	24,1	24,4	24,7	24,1	23,5	22,8	22,0	21,3	20,5	
(*) Desplazamiento total horizontal en servicio en apoyos. El desplazamiento es relativo a la sobrecarga de servicio. Los coeficientes de seguridad ya se han contemplado internamente en los cálculos.																						



ESTADO LÍMITE ÚLTIMO

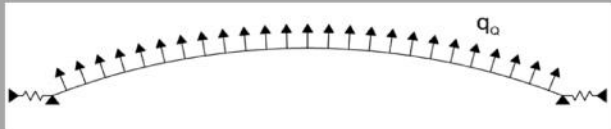
CHAPA H68		CARGA GRAVITATORIA UNIFORME (PRESIÓN UNIFORME)																					
		q (daN/m²) E.L.U. (ESTADO LÍMITE ÚLTIMO)																					
Espesor=1.2 mm		f (mm)																					
L (mm)	9000	163	177	190	198	207	213	220	220	220	217	213	207	200	197	193	187	180	173	167	160	153	
	9500	133	147	160	168	177	182	187	190	193	193	193	190	187	180	173	170	167	160	153	147	140	
	10000	110	122	133	142	150	155	160	163	167	167	167	167	167	163	160	157	153	150	147	140	133	
	10500	90	100	110	118	127	132	137	142	147	148	150	148	147	147	147	143	140	137	133	130	127	
	11000	74	83	92	99	107	112	117	122	127	128	130	132	133	133	133	130	127	127	127	123	120	
	11500	61	69	77	83	90	95	100	103	107	110	113	115	117	118	120	118	117	115	113	110	107	
	12000	50	57	63	69	76	81	86	90	93	97	100	102	103	103	103	105	107	105	103	102	100	
	12500	41	47	53	58	63	68	73	76	80	83	87	88	90	92	93	93	93	93	93	93	93	
	13000	33	39	44	49	53	58	62	65	69	71	73	76	79	81	82	83	83	83	83	83	83	
	13500	27	32	36	40	45	48	52	56	59	61	63	66	69	70	72	73	73	74	76	76	76	
	14000	-	-	30	34	38	41	44	47	50	53	55	57	60	61	63	64	66	66	67	67	67	
(*) Esta tabla solo tiene valor informativo. No debe utilizarse para el diseño. El diseño se realizaría comparando los resultados de esta tabla con la carga a soportar sin mayorar. Los coeficientes de seguridad ya se han contemplado internamente en los cálculos.																							
<div><div></div> VALORES MÁS BAJOS SI CONSIDERAMOS LIMITACIÓN POR FLECHA DE L/150 y L/200</div> <div><div></div> VALORES MÁS BAJOS SI CONSIDERAMOS LIMITACIÓN POR FLECHA DE L/200</div> <div><div></div> VALORES LIMITADOS POR RESISTENCIA DE LA CHAPA</div>																							

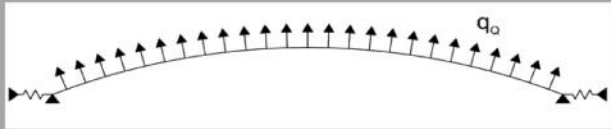
CHAPA H68		CARGA GRAVITATORIA UNIFORME (PRESIÓN UNIFORME)																					
		AXIL CABLE E.L.U. (N / 2,5m)																					
Espesor=1.2 mm		f (mm)																					
L (mm)	9000	29311	28181	27051	25773	24495	23439	22382	21001	19620	18285	16950	15647	14343	13479	12614	11698	10783	10005	9227	8559	7891	
	9500	27273	26572	25870	24785	23700	22577	21455	20456	19457	18386	17315	16194	15074	13920	12766	12012	11259	10424	9589	8872	8155	
	10000	25625	25002	24379	23529	22680	21681	20683	19764	18845	17807	16769	15935	15101	14153	13205	12412	11618	10942	10266	9485	8704	
	10500	23792	23227	22661	22089	21516	20653	19789	19170	18550	17698	16847	15851	14855	14179	13504	12673	11842	11137	10431	9824	9217	
	11000	22340	21842	21343	20825	20307	19593	18879	18375	17871	17071	16271	15641	15010	14327	13644	12781	11918	11452	10986	10336	9687	
	11500	20841	20432	20023	19562	19102	18580	18059	17409	16759	16264	15769	15172	14575	14092	13608	12874	12140	11523	10907	10239	9571	
	12000	19509	19051	18593	18310	18028	17638	17249	16766	16284	15851	15418	14852	14286	13635	12983	12619	12256	11615	10974	10430	9885	
	12500	18084	17754	17423	17151	16878	16594	16309	15901	15492	15134	14775	14267	13759	13346	12933	12391	11849	11389	10929	10533	10137	
	13000	17081	16779	16477	16198	15919	15687	15454	15125	14796	14333	13871	13632	13394	12995	12596	12117	11637	11186	10735	10347	9958	
	13500	15910	15647	15384	15146	14908	14729	14551	14308	14065	13659	13254	13025	12796	12483	12170	11726	11282	10989	10697	10329	9962	
	14000	-	-	14545	14425	14305	14032	13759	13504	13250	13026	12802	12539	12276	11979	11682	11385	11089	10725	10362	9988	9613	
(*) Los valores se han obtenido incorporando el coeficiente de mayoración 1.5 para la carga variable y 1.35 para el peso propio del perfil. Los cables se disponen cada 2,5 metros lineales de chapa. En base a ello, la carga axil que recibe el cable es por cada 2,5 metros lineales de chapa.																							
<div><div></div> VALORES QUE NO AGUANTA EL CABLE.</div> <div>Axil último 24014,8 N (Calculado con coeficiente de minoración de 2 para el cable.)</div>																							




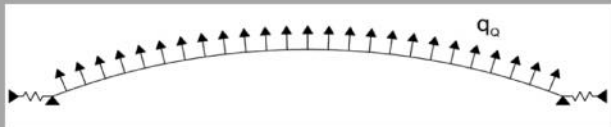
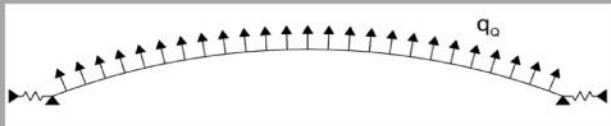
ESTADO LÍMITE DE SERVICIO

FLECHA MÁXIMA L/150

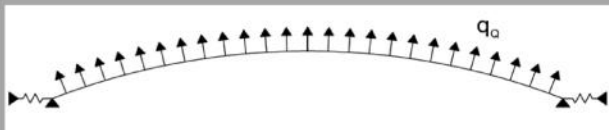
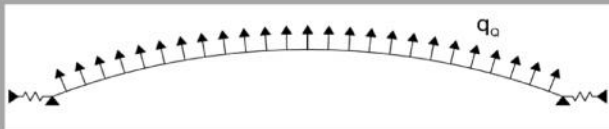
CHAPA H68		K250	CARGA SUCCIÓN UNIFORME (VIENTO FRONTAL)																			
			q (daN/m²) E.L.S. (ESTADO LÍMITE DE SERVICIO) L/150																			
Espesor=1.2 mm		f (mm)																				
		1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000
L (mm)	9000	67	80	92	106	121	137	153	169	185	202	219	230	241	264	286	308	330	353	375	414	453
	9500	61	72	82	95	107	122	136	150	163	175	186	197	208	225	241	258	275	297	319	347	375
	10000	54	62	71	82	93	107	121	137	152	158	163	175	186	197	208	225	241	258	275	297	319
	10500	51	59	67	76	85	97	109	119	130	141	152	158	164	175	186	197	208	225	242	258	275
	11000	49	54	60	71	81	90	99	111	123	126	130	141	152	158	164	175	186	197	208	225	242
	11500	43	51	59	67	75	83	91	99	108	113	119	130	141	147	152	163	175	180	186	197	208
	12000	43	47	52	60	68	76	84	92	100	106	111	115	119	130	141	147	153	164	175	180	186
	12500	40	45	50	55	60	70	80	88	96	102	108	113	119	124	130	136	141	147	153	164	175
	13000	34	41	48	53	59	66	74	80	85	91	97	98	100	106	112	121	130	136	141	147	153
	13500	33	38	43	48	53	60	67	74	82	83	85	91	97	102	108	113	119	125	130	136	141
14000	32	37	42	46	50	58	65	70	74	80	85	85	85	85	93	100	104	108	113	119	125	130
(*) Para realizar un dimensionamiento se compararán los resultados de esta tabla con la carga a soportar sin mayorar. Los coeficientes de seguridad ya se han contemplado internamente en los cálculos.																						
(*) Es recomendable emplear una limitación de flecha de L/200 para realizar el dimensionamiento.																						

CHAPA H68		K250	CARGA SUCCIÓN UNIFORME (VIENTO FRONTAL)																			
			Desplazamiento horizontal de un apoyo (mm) E.L.S. L/150																			
Espesor=1.2 mm		f (mm)																				
		1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000
L (mm)	9000	16,56	18,61	20,66	22,40	24,13	25,61	27,10	27,99	28,89	29,43	29,96	29,42	28,89	29,38	29,87	29,89	29,91	29,54	29,17	29,55	29,93
	9500	16,52	18,43	20,35	22,10	23,85	25,38	26,91	27,78	28,66	28,72	28,77	28,60	28,44	28,75	29,06	29,04	29,02	29,20	29,39	29,61	29,84
	10000	15,62	17,38	19,13	20,97	22,80	24,70	26,60	28,23	29,86	29,12	28,39	28,54	28,69	28,58	28,48	28,87	29,26	29,31	29,36	29,62	29,88
	10500	16,29	18,08	19,87	21,29	22,71	24,47	26,23	27,17	28,10	28,79	29,47	28,83	28,20	28,41	28,62	28,59	28,55	29,03	29,50	29,61	29,72
	11000	16,75	17,83	18,91	21,32	23,72	24,91	26,11	27,66	29,22	28,45	27,67	28,43	29,18	28,61	28,03	28,31	28,59	28,62	28,65	29,20	29,74
	11500	15,29	17,77	20,26	22,01	23,76	25,00	26,23	27,07	27,91	27,81	27,70	28,75	29,80	29,36	28,92	29,43	29,94	29,28	28,62	28,72	28,81
	12000	16,66	17,64	18,63	20,78	22,94	24,50	26,05	27,16	28,26	28,31	28,37	27,82	27,27	28,38	29,50	29,13	28,76	29,33	29,90	29,28	28,66
	12500	16,66	18,11	19,55	20,61	21,67	24,26	26,85	28,17	29,49	29,65	29,82	29,84	29,86	29,75	29,64	29,43	29,22	28,91	28,60	29,23	29,86
	13000	13,92	16,88	19,83	21,28	22,74	24,65	26,56	27,22	27,89	28,32	28,75	27,87	26,99	27,19	27,39	28,34	29,29	29,14	28,99	28,74	28,49
	13500	14,27	16,27	18,27	19,83	21,38	23,35	25,32	27,00	28,67	27,86	27,06	27,56	28,06	28,38	28,69	28,85	29,00	29,02	29,04	28,93	28,81
14000	14,33	16,65	18,96	20,31	21,66	24,14	26,61	27,10	27,60	28,42	29,23	27,82	26,41	27,57	28,74	28,48	28,22	28,44	28,65	28,73	28,81	
(*) Desplazamiento horizontal en servicio de un apoyo. El desplazamiento es relativo a la sobrecarga de servicio. Los coeficientes de seguridad ya se han contemplado internamente en los cálculos.																						
(*) Es recomendable emplear una limitación de flecha de L/200 para realizar el dimensionamiento.																						



ESTADO LÍMITE DE SERVICIO	FLECHA MÁXIMA L/200	CHAPA H68		K250	CARGA SUCCIÓN UNIFORME (VIENTO FRONTAL)																						
					q (daN/m²) E.L.S. (ESTADO LÍMITE DE SERVICIO) L/200																						
		Espesor=1.2 mm		f (mm)																							
				1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000			
		L (mm)	9000	52	62	72	81	91	104	118	137	155	170	184	208	231	259	286	308	330	353	375	414	453			
			9500	46	54	62	72	82	94	106	122	138	150	161	182	203	222	241	258	275	297	319	347	375			
			10000	44	50	56	65	73	85	96	109	122	133	143	165	186	197	208	225	241	258	275	297	319			
			10500	41	47	52	61	70	79	89	97	105	116	127	145	164	175	186	197	208	225	242	258	275			
			11000	39	44	50	56	61	70	79	86	93	104	115	131	147	155	164	175	186	197	208	225	242			
			11500	38	41	44	52	60	68	76	82	88	98	109	120	131	142	152	163	175	180	186	197	208			
			12000	33	37	42	47	53	61	69	75	80	93	106	113	119	130	141	147	153	164	175	180	186			
			12500	30	35	40	45	50	58	65	68	71	82	93	101	109	119	130	136	141	147	153	164	175			
			13000	29	33	38	43	49	54	59	67	75	81	87	93	100	106	112	121	130	136	141	147	153			
			13500	28	33	38	40	43	50	57	62	67	73	80	88	97	102	108	113	119	125	130	136	141			
		14000	27	32	37	39	40	48	55	60	64	70	75	80	85	93	100	104	108	113	119	125	130				
		(*) Para realizar un dimensionamiento se compararán los resultados de esta tabla con la carga a soportar sin mayorar. Los coeficientes de seguridad ya se han contemplado internamente en los cálculos.																									
		CHAPA H68		K250	CARGA SUCCIÓN UNIFORME (VIENTO FRONTAL)																						
					Desplazamiento horizontal de un apoyo (mm) E.L.S. L/200																						
		Espesor=1.2 mm		f (mm)																							
				1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000			
		L (mm)	9000	12,02	13,77	15,53	16,52	17,52	18,97	20,42	22,13	23,84	24,68	25,52	26,90	28,29	29,08	29,87	29,89	29,91	29,54	29,17	29,55	29,93			
			9500	11,41	12,98	14,55	16,08	17,61	19,01	20,41	22,10	23,79	24,50	25,21	26,78	28,35	28,71	29,06	29,04	29,02	29,20	29,39	29,61	29,84			
			10000	11,81	13,03	14,25	15,72	17,19	18,84	20,49	21,87	23,24	24,22	25,21	26,95	28,68	28,58	28,48	28,87	29,26	29,31	29,36	29,62	29,88			
			10500	12,08	13,27	14,46	16,24	18,02	19,38	20,75	21,68	22,62	23,70	24,79	26,49	28,20	28,41	28,62	28,59	28,55	29,03	29,50	29,61	29,72			
			11000	12,11	13,51	14,92	15,87	16,82	18,41	20,00	20,90	21,79	23,24	24,70	26,43	28,15	28,09	28,03	28,31	28,59	28,62	28,65	29,20	29,74			
			11500	12,73	13,21	13,69	15,88	18,07	19,60	21,13	21,85	22,58	24,12	25,67	26,59	27,51	28,22	28,92	29,43	29,94	29,28	28,62	28,72	28,81			
			12000	11,08	12,44	13,81	15,24	16,68	18,55	20,42	21,39	22,36	24,38	26,39	26,83	27,27	28,38	29,50	29,13	28,76	29,33	29,90	29,28	28,66			
			12500	10,58	12,45	14,33	15,70	17,07	18,87	20,68	20,96	21,24	23,20	25,17	26,12	27,07	28,36	29,64	29,43	29,22	28,91	28,60	29,23	29,86			
			13000	10,58	12,38	14,17	15,96	17,76	18,78	19,80	21,70	23,59	24,47	25,35	26,17	26,99	27,19	27,39	28,34	29,29	29,14	28,99	28,74	28,49			
			13500	10,67	12,92	15,18	15,57	15,95	18,11	20,28	21,15	22,02	23,61	25,20	26,63	28,05	28,37	28,69	28,85	29,00	29,02	29,04	28,93	28,81			
		14000	10,45	13,04	15,64	15,72	15,81	18,49	21,18	21,91	22,65	23,95	25,24	25,83	26,41	27,57	28,74	28,48	28,22	28,44	28,65	28,73	28,81				
		(*) Desplazamiento horizontal en servicio de un apoyo. El desplazamiento es relativo a la sobrecarga de servicio. Los coeficientes de seguridad ya se han contemplado internamente en los cálculos.																									

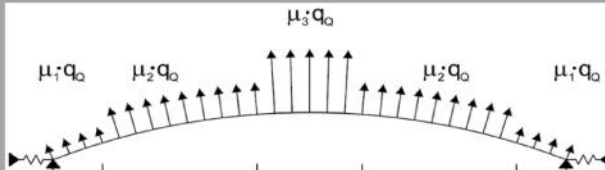
ESTADO LÍMITE ÚLTIMO

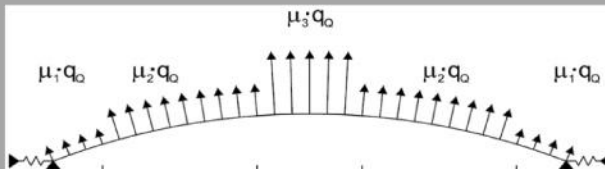
CHAPA H68		K250	CARGA SUCCIÓN UNIFORME (VIENTO FRONTAL)																				
			q (daN/m²) E.L.U. (ESTADO LÍMITE ÚLTIMO)																				
Espesor=1.2 mm		f (mm)																					
		1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000	
L (mm)	9000	173	203	233	253	273	307	340	357	373	407	440	473	507	540	573	590	607	640	673	707	740	
	9500	173	190	207	236	266	286	307	340	373	390	407	440	473	490	507	540	573	590	607	640	673	
	10000	166	186	207	223	240	266	292	316	340	357	373	407	440	457	473	490	507	540	573	590	607	
	10500	159	175	192	212	233	253	273	290	307	323	340	373	407	423	440	457	473	507	540	557	573	
	11000	140	157	173	190	207	233	259	279	299	320	340	357	373	390	407	423	440	457	473	507	540	
	11500	140	157	173	190	207	223	240	257	273	290	307	323	340	357	373	390	407	440	473	490	507	
	12000	140	153	166	183	199	216	233	249	266	283	299	320	340	357	373	390	407	423	440	457	473	
	12500	133	146	159	175	192	199	207	223	240	257	273	290	307	323	340	357	373	390	407	423	440	
	13000	125	138	151	162	173	190	207	223	240	257	273	286	299	316	333	336	340	357	373	390	407	
	13500	125	133	140	157	173	186	199	212	225	233	240	257	273	290	307	323	340	357	373	373	373	
	14000	118	129	140	153	166	179	192	199	207	223	240	257	273	286	299	303	307	323	340	357	373	
(*) Esta tabla solo tiene valor informativo. No debe utilizarse para el diseño. El diseño se realizaría comparando los resultados de esta tabla con la carga a soportar sin mayorar. Los coeficientes de seguridad ya se han contemplado internamente en los cálculos.																							
<div><div></div> VALORES MÁS BAJOS SI CONSIDERAMOS LIMITACIÓN POR FLECHA DE L/150 y L/200</div> <div><div></div> VALORES MÁS BAJOS SI CONSIDERAMOS LIMITACIÓN POR FLECHA DE L/200</div> <div><div></div> VALORES LIMITADOS POR RESISTENCIA DE LA CHAPA</div>																							
CHAPA H68		K250	CARGA SUCCIÓN UNIFORME (VIENTO FRONTAL)																				
			Rh (daN/m) REACCIÓN HORIZONTAL E.L.U. (ESTADO LÍMITE ÚLTIMO)																				
Espesor=1.2 mm		f (mm)																					
		1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000	
L (mm)	9000	1086	1178	1270	1292	1314	1372	1429	1408	1387	1408	1430	1435	1440	1430	1420	1365	1309	1279	1249	1208	1166	
	9500	1195	1228	1261	1342	1422	1437	1451	1502	1554	1528	1503	1521	1539	1498	1457	1450	1443	1389	1335	1308	1280	
	10000	1256	1319	1383	1405	1427	1481	1535	1561	1586	1570	1554	1587	1620	1586	1551	1512	1473	1469	1465	1413	1361	
	10500	1310	1360	1410	1464	1518	1553	1588	1591	1594	1588	1582	1631	1680	1654	1628	1596	1564	1572	1580	1534	1488	
	11000	1266	1330	1395	1440	1484	1566	1649	1678	1708	1724	1741	1730	1719	1702	1684	1660	1636	1607	1577	1588	1599	
	11500	1362	1433	1504	1555	1605	1640	1674	1694	1715	1725	1734	1734	1734	1726	1719	1703	1688	1724	1759	1726	1693	
	12000	1457	1506	1554	1614	1673	1715	1757	1785	1813	1829	1844	1868	1892	1888	1883	1871	1858	1839	1820	1795	1770	
	12500	1482	1539	1596	1665	1735	1718	1701	1742	1784	1811	1839	1856	1872	1878	1885	1883	1881	1871	1861	1845	1828	
	13000	1497	1564	1630	1662	1693	1757	1821	1868	1915	1948	1981	1980	1978	1991	2003	1941	1879	1880	1880	1873	1866	
	13500	1586	1601	1617	1710	1802	1842	1882	1909	1937	1914	1891	1926	1962	1985	2008	2021	2034	2038	2042	1961	1881	
	14000	1588	1650	1712	1776	1841	1888	1936	1924	1913	1967	2022	2062	2102	2107	2111	2054	1996	2012	2028	2034	2041	


(*) Reacción horizontal máxima en apoyo por metro lineal de chapa. Los coeficientes de seguridad ya se han contemplado internamente en los cálculos.

ESTADO LÍMITE DE SERVICIO

FLECHA MÁXIMA L/150

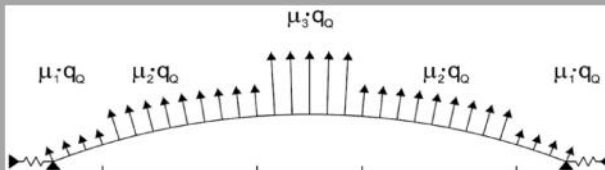
CHAPA H68		CARGA SUCCIÓN NO UNIFORME (VIENTO LATERAL)																				
		K250										Caso 3a MARQUESINA										
		q (daN/m²) E.L.S. (ESTADO LÍMITE DE SERVICIO) L/150																				
Espesor=1.2 mm		f (mm)																				
		1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000
L (mm)	9000	37	43	50	59	68	78	87	102	117	118	120	134	148	158	168	176	183	200	217	232	247
	9500	32	41	50	54	58	71	83	88	92	103	115	118	120	134	148	151	153	168	183	195	207
	10000	35	38	40	48	55	64	73	78	82	92	102	106	110	115	120	128	135	147	158	171	183
	10500	32	34	37	46	55	59	63	73	83	88	92	97	102	106	110	115	120	128	135	147	158
	11000	32	34	37	41	45	50	55	64	73	78	82	87	92	97	102	106	110	115	120	128	135
	11500	25	31	37	41	45	48	50	57	63	66	68	75	82	84	87	94	102	106	110	115	120
	12000	22	24	27	31	35	40	45	54	63	61	58	63	68	73	77	82	87	94	102	108	115
	12500	22	24	27	31	35	40	45	48	50	54	58	63	68	68	67	72	77	82	87	94	102
	13000	18	24	30	33	37	41	45	48	50	49	48	53	58	63	68	68	67	72	77	82	87
	13500	18	23	27	29	32	33	35	38	40	45	50	57	63	66	68	68	68	75	82	79	77
14000	18	23	27	27	27	31	35	38	40	45	50	49	48	53	58	63	68	68	75	82	87	
(*) Para realizar un dimensionamiento se compararán los resultados de esta tabla con la carga a soportar sin mayorar. Los coeficientes de seguridad ya se han contemplado internamente en los cálculos.																						
(*) Es recomendable emplear una limitación de flecha de L/200 para realizar el dimensionamiento.																						

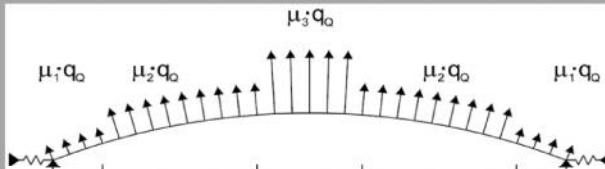
CHAPA H68		CARGA SUCCIÓN NO UNIFORME (VIENTO LATERAL)																				
		K250										Caso 3a MARQUESINA										
		Desplazamiento horizontal de un apoyo (mm) E.L.S. L/150																				
Espesor=1.2 mm		f (mm)																				
		1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000
L (mm)	9000	13,79	15,64	17,48	19,61	21,75	23,20	24,66	27,17	29,67	28,29	26,90	28,21	29,53	29,56	29,59	28,96	28,33	28,84	29,35	29,20	29,05
	9500	12,77	16,18	19,59	20,02	20,44	23,52	26,60	26,29	25,97	27,59	29,20	28,11	27,01	28,42	29,83	28,56	27,29	28,11	28,93	28,83	28,72
	10000	16,19	16,44	16,69	19,00	21,30	23,58	25,86	25,78	25,70	27,26	28,83	28,34	27,85	27,51	27,16	27,24	27,33	27,99	28,66	29,10	29,54
	10500	15,72	16,15	16,58	20,08	23,59	23,99	24,39	26,80	29,21	29,01	28,81	28,76	28,71	28,30	27,89	27,61	27,32	27,48	27,63	28,38	29,12
	11000	17,28	17,76	18,24	19,40	20,55	21,74	22,93	25,51	28,10	28,15	28,20	28,39	28,59	28,61	28,64	28,30	27,95	27,74	27,52	27,74	27,95
	11500	13,64	16,80	19,96	21,24	22,51	22,52	22,53	24,40	26,26	25,90	25,54	26,71	27,88	27,31	26,74	27,67	28,61	28,33	28,05	27,89	27,73
	12000	11,95	13,09	14,23	16,12	18,00	19,87	21,73	25,23	28,73	26,07	23,42	24,29	25,16	25,46	25,77	26,19	26,62	27,62	28,63	29,10	29,56
	12500	12,99	14,23	15,46	17,52	19,57	21,61	23,64	23,76	23,87	24,73	25,58	26,56	27,54	25,85	24,17	24,87	25,58	26,06	26,55	27,61	28,68
	13000	10,58	15,13	19,68	21,07	22,47	24,04	25,61	25,76	25,91	24,12	22,32	23,70	25,07	26,11	27,15	25,54	23,92	24,68	25,44	25,98	26,52
	13500	11,42	14,73	18,04	19,05	20,07	20,17	20,27	20,84	21,41	23,30	25,19	27,53	29,88	29,70	29,52	28,17	26,83	28,33	29,83	27,59	25,34
14000	12,29	15,83	19,37	18,21	17,05	19,44	21,83	22,46	23,09	25,14	27,19	25,39	23,60	25,15	26,70	27,91	29,12	27,84	26,57	28,12	29,67	
(*) Desplazamiento horizontal en servicio de un apoyo. El desplazamiento es relativo a la sobrecarga de servicio. Los coeficientes de seguridad ya se han contemplado internamente en los cálculos.																						
(*) Es recomendable emplear una limitación de flecha de L/200 para realizar el dimensionamiento.																						




ESTADO LÍMITE DE SERVICIO

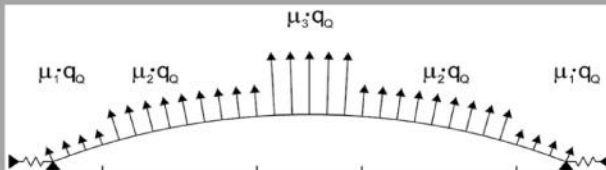
FLECHA MÁXIMA L/200

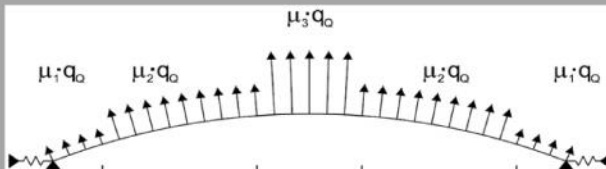
CHAPA H68		CARGA SUCCIÓN NO UNIFORME (VIENTO LATERAL)																				
		K250										Caso 3a MARQUESINA										
		q (daN/m²) E.L.S. (ESTADO LÍMITE DE SERVICIO) L/200																				
Espesor=1.2 mm		f (mm)																				
		1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000
L (mm)	9000	27	33	40	44	48	58	67	77	87	98	110	119	128	143	158	171	183	195	207	222	237
	9500	32	36	40	44	48	56	63	68	72	83	95	103	110	124	138	146	153	168	183	195	207
	10000	25	28	30	38	45	49	53	63	72	77	82	91	100	110	120	128	135	147	158	171	183
	10500	22	24	27	31	35	44	53	58	63	68	72	82	92	101	110	115	120	128	135	147	158
	11000	22	24	27	31	35	40	45	49	53	63	72	77	82	87	92	101	110	115	120	128	135
	11500	15	21	27	31	35	38	40	47	53	56	58	65	72	79	87	94	102	106	110	115	120
	12000	22	24	27	26	25	30	35	39	43	51	58	63	68	73	77	82	87	94	102	108	115
	12500	12	14	17	21	25	30	35	38	40	44	48	53	58	63	67	72	77	82	87	94	102
	13000	18	19	20	23	27	31	35	38	40	44	48	53	58	63	68	68	67	72	77	82	87
	13500	18	18	17	19	22	23	25	33	40	40	40	47	53	56	58	63	68	75	82	79	77
14000	18	18	17	22	27	26	25	28	30	35	40	44	48	53	58	63	68	68	68	75	82	
(*) Para realizar un dimensionamiento se compararán los resultados de esta tabla con la carga a soportar sin mayorar. Los coeficientes de seguridad ya se han contemplado internamente en los cálculos.																						

CHAPA H68		CARGA SUCCIÓN NO UNIFORME (VIENTO LATERAL)																				
		K250										Caso 3a MARQUESINA										
		Desplazamiento horizontal de un apoyo (mm) E.L.S. L/200																				
Espesor=1.2 mm		f (mm)																				
		1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000
L (mm)	9000	8,94	11,14	13,33	13,96	14,59	16,53	18,47	20,05	21,62	23,08	24,54	24,96	25,39	26,58	27,78	28,05	28,33	28,15	27,96	27,91	27,85
	9500	12,77	13,88	14,98	15,70	16,41	18,03	19,65	19,74	19,83	21,83	23,82	24,23	24,63	26,19	27,74	27,51	27,29	28,11	28,93	28,83	28,72
	10000	10,19	10,83	11,46	14,14	16,82	17,42	18,03	20,14	22,25	22,50	22,75	23,95	25,16	26,16	27,16	27,24	27,33	27,99	28,66	29,10	29,54
	10500	9,03	9,89	10,75	12,17	13,60	16,82	20,04	20,80	21,57	21,78	21,99	23,84	25,68	26,78	27,89	27,61	27,32	27,48	27,63	28,38	29,12
	11000	9,97	10,92	11,87	13,44	15,01	16,55	18,08	18,83	19,58	22,00	24,42	24,81	25,20	25,40	25,61	26,78	27,95	27,74	27,52	27,74	27,95
	11500	5,37	9,20	13,03	14,76	16,48	16,84	17,19	19,38	21,57	21,45	21,33	22,72	24,12	25,43	26,74	27,67	28,61	28,33	28,05	27,89	27,73
	12000	11,95	13,09	14,23	12,74	11,25	13,55	15,85	17,13	18,42	20,92	23,42	24,29	25,16	25,46	25,77	26,19	26,62	27,62	28,63	29,10	29,56
	12500	3,02	4,99	6,95	9,61	12,27	14,77	17,28	17,74	18,19	19,35	20,51	21,75	22,99	23,58	24,17	24,87	25,58	26,06	26,55	27,61	28,68
	13000	10,58	10,63	10,68	12,66	14,65	16,70	18,75	19,26	19,78	21,05	22,32	23,70	25,07	26,11	27,15	25,54	23,92	24,68	25,44	25,98	26,52
	13500	11,42	9,81	8,19	9,84	11,50	12,08	12,66	17,04	21,41	20,29	19,18	21,85	24,52	24,58	24,64	25,74	26,83	28,33	29,83	27,59	25,34
14000	12,29	10,56	8,83	12,94	17,05	15,36	13,67	14,75	15,82	18,27	20,73	22,16	23,60	25,15	26,70	27,91	29,12	27,84	26,57	28,12	29,67	
(*) Desplazamiento horizontal en servicio de un apoyo. El desplazamiento es relativo a la sobrecarga de servicio. Los coeficientes de seguridad ya se han contemplado internamente en los cálculos.																						



ESTADO LÍMITE ÚLTIMO

CHAPA H68		CARGA SUCCIÓN NO UNIFORME (VIENTO LATERAL)																				
		K250										Caso 3a MARQUESINA										
		q (daN/m²) E.L.U. (ESTADO LÍMITE ÚLTIMO)																				
Espesor=1.2 mm		f (mm)																				
		1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000
L (mm)	9000	97	113	130	147	163	175	187	197	207	223	240	247	253	263	273	273	273	290	307	307	307
	9500	97	108	120	137	153	163	173	185	197	208	220	230	240	247	253	263	273	273	273	285	297
	10000	90	105	120	130	140	152	163	175	187	197	207	218	230	235	240	240	240	252	263	268	273
	10500	87	97	107	118	130	142	153	163	173	185	197	202	207	218	230	235	240	240	240	252	263
	11000	87	97	107	118	130	135	140	152	163	175	187	192	197	202	207	218	230	235	240	240	240
	11500	80	93	107	113	120	130	140	147	153	163	173	180	187	197	207	207	207	218	230	235	240
	12000	77	87	97	108	120	125	130	142	153	158	163	168	173	185	197	202	207	207	207	213	220
	12500	77	87	97	103	110	120	130	135	140	152	163	168	173	180	187	192	197	202	207	207	207
	13000	73	82	90	98	107	113	120	130	140	147	153	158	163	168	173	180	187	192	197	202	207
	13500	73	80	87	97	107	113	120	125	130	135	140	147	153	163	173	173	173	180	187	192	197
14000	73	80	87	92	97	103	110	120	130	135	140	147	153	158	163	168	173	173	173	180	187	
(*) Esta tabla solo tiene valor informativo. No debe utilizarse para el diseño. El diseño se realizaría comparando los resultados de esta tabla con la carga a soportar sin mayorar. Los coeficientes de seguridad ya se han contemplado internamente en los cálculos.																						
<div><div></div> VALORES MÁS BAJOS SI CONSIDERAMOS LIMITACIÓN POR FLECHA DE L/150 y L/200</div> <div><div></div> VALORES MÁS BAJOS SI CONSIDERAMOS LIMITACIÓN POR FLECHA DE L/200</div> <div><div></div> VALORES LIMITADOS POR RESISTENCIA DE LA CHAPA</div>																						

CHAPA H68		CARGA SUCCIÓN NO UNIFORME (VIENTO LATERAL)																				
		K250										Caso 3a MARQUESINA										
		Rh (daN/m) REACCIÓN HORIZONTAL E.L.U. (ESTADO LÍMITE ÚLTIMO)																				
Espesor=1.2 mm		f (mm)																				
		1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000
L (mm)	9000	987	1076	1165	1227	1288	1296	1304	1293	1282	1299	1315	1275	1234	1206	1178	1110	1043	1033	1023	958	893
	9500	1088	1143	1197	1273	1348	1352	1357	1364	1370	1368	1366	1347	1329	1290	1252	1226	1200	1134	1067	1043	1019
	10000	1116	1214	1313	1340	1366	1393	1420	1435	1449	1443	1437	1434	1432	1387	1343	1275	1207	1194	1180	1136	1091
	10500	1173	1231	1288	1343	1397	1434	1471	1482	1492	1505	1519	1480	1442	1442	1442	1399	1357	1291	1225	1213	1202
	11000	1269	1332	1396	1457	1518	1498	1478	1513	1547	1569	1591	1555	1520	1484	1447	1450	1453	1413	1372	1307	1242
	11500	1272	1389	1505	1517	1529	1566	1603	1597	1590	1607	1624	1606	1588	1590	1593	1524	1454	1460	1465	1426	1388
	12000	1313	1398	1482	1563	1645	1632	1620	1670	1721	1696	1671	1644	1617	1641	1664	1631	1597	1529	1462	1440	1417
	12500	1402	1493	1584	1609	1633	1687	1740	1725	1710	1758	1806	1780	1754	1740	1726	1696	1665	1634	1602	1537	1471
	13000	1434	1510	1586	1641	1697	1717	1736	1785	1835	1836	1836	1815	1793	1770	1746	1735	1723	1695	1667	1638	1609
	13500	1520	1575	1629	1718	1806	1829	1851	1844	1837	1826	1814	1818	1821	1851	1882	1811	1740	1732	1723	1697	1671
14000	1606	1665	1725	1742	1758	1791	1824	1891	1958	1948	1939	1944	1950	1932	1914	1894	1874	1805	1737	1730	1724	

(*) Reacción horizontal máxima en apoyo por metro lineal de chapa. Los coeficientes de seguridad ya se han contemplado internamente en los cálculos.

7 COMPROBACIÓN SOPORTES

En este capítulo se especifica el sistema realizado de verificación según normativa, de los soportes donde apoya la cubierta, en el caso que los apoyos sean perfiles laminados metálicos.

7.1 SISTEMA DE VERIFICACIÓN DE LOS SOPORTES

Una vez se tienen los datos de las tablas de capacidad para el perfil curvado de chapa de acero conformado en frío se procede a la comprobación de los soportes donde éstos apoyarán.

Con tal fin se han diseñado y realizado unas hojas de cálculo de comprobación de soportes. En ellas se introducen los valores necesarios para la comprobación de los citados soportes de la cubierta curvada autoportante, que posteriormente se detallan. Estas hojas de cálculo están programadas para que una vez introducidos los datos hagan los cálculos y comprobaciones necesarias, según normativas y nos confirmen si cumple o no el objeto estudiado. Esta comprobación se realiza siguiendo la normativa de acero actual, *la EAE Instrucción de acero estructural [5]*

Para esta comprobación se realiza un libro de Excel con varias pestañas o hojas interrelacionadas, dos principales (SUCCIÓN y PRESIÓN) y 5 pestañas auxiliares (Rigideces pilares_Succión, Rigideces pilares_Presión, Datos Perfiles, Tablas EAE y Listas desplegables)

Las pestañas u hojas principales son donde se introducirán los datos y también donde se mostrarán los resultados de las comprobaciones. Las pestañas auxiliares ayudan a la automatización de los cálculos que se ejecutan.

El orden lógico de la comprobación será primero actuando succión y luego presión porque se ha de introducir la rigidez K de los apoyos necesaria para los casos de succión. Pero si se hace primero la presión y luego la succión no sería relevante. Incluso se pueden comprobar los soportes sólo a succión o sólo a presión ya que los cálculos están individualizados para cada caso.

Las diferentes hojas y el libro entero estarán protegidos para evitar que se puedan manipular. De esta forma se evita que por error se borren o alteren los resultados que se calculan. Sólo se podrán introducir datos en las casillas para tal efecto. Tal y como se observa en la leyenda, que se puede ver en la Fig. 7.1, estas casillas son de color amarillo claro. Las casillas o celdas de color verde claro serán las que den valores automáticos.

Por último las verificaciones aparecerán en letra verde si cumplen y en letra roja si no cumple y la comprobación total del pilar en cada caso (succión o presión) estará dentro de una casilla de color verde si cumple que cambiará a roja si por el contrario no cumple.

A continuación se realiza un resumen del contenido de las diferentes pestañas. Para más información ver el **ANEJO B: Hojas de cálculo**

7.2 PESTAÑA PRINCIPAL DE SUCCIÓN

La pestaña u hoja de cálculo principal de SUCCIÓN tiene 11 páginas. En ellas están diferenciadas las siguientes zonas.

- Zona 1: Datos a rellenar (página 1)
- Zona 2: Resumen comprobación (página 2)
- Zona 3: Otros datos (página 3)
- Zona 4: Comprobaciones a realizar (página 4)
- Zona 5: Cálculos (desde la página 5 a la 9)
- Zona 6: Comprobaciones realizadas (páginas 10 y 11)

7.2.1 Datos a rellenar

La zona de entrada de Datos de la hoja SUCCIÓN o Datos a rellenar se encuentra en la página 1.

Algunas de las celdas o casillas están sombradas de diferentes colores para saber a qué hacen referencia cada color, se ha de mirar la leyenda.





LEYENDA	
	Rellenar con datos
	Resultados automáticos
	Comentarios
	Datos prontuario perfiles

Fig. 7.1 Leyenda de las hojas SUCCIÓN y PRESIÓN

Para la comprobación de los pilares que soportan la cubierta de chapa curva sometida a succión se tendrán que rellenar los siguientes datos:

- Tipo de perfil
- Elección de la calidad del Acero
- Longitud o altura del soporte a comprobar, H

- Longitud del arco; Cuerda del arco que describe la chapa de acero conformada en frío, L
- Flecha del arco que describe la chapa de acero conformada en frío, f
- Separación entre soportes, s
- Carga admisible de succión, $q_{adm\ suc}$ (sin mayorar)
- Fuerza horizontal, $F_{Horizontal}$
- Desplazamiento soporte, $\delta_{soporte}$
- Rigidez horizontal mínima necesaria de los soportes, K_{min}
- Elegir otro perfil si se desea (opcional)

Si se desea en la parte superior derecha se puede introducir un nombre, por ejemplo el del soporte que se está comprobando.

Al lado de la variable de cada dato a introducir, se indica la unidad en que debe realizarse.

Para facilitar la entrada de datos, las unidades de $q_{adm\ suc}$ serán daN/m^2 y las de $F_{Horizontal}$ serán daN que son las mismas unidades en que se encuentran los valores en las tablas de capacidad de carga del perfil curvado H68 de chapa curvada de acero conformada en frío. Luego, internamente, para trabajar en unidades del sistema internacional, los daN se pasarán a N .

Para hacer más intuitiva la introducción de datos se ha realizado un esquema (Fig. 7.2) de la estructura con los nombres de las longitudes correspondientes.

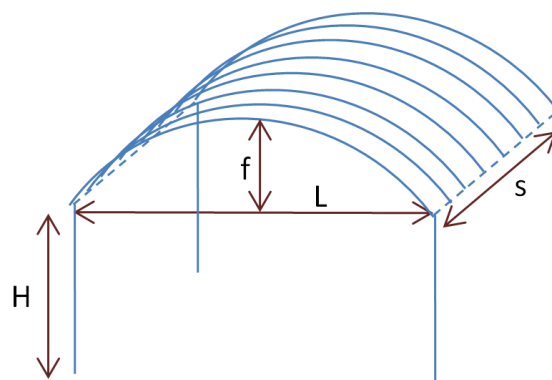


Fig. 7.2 Esquema de la estructura

Existen dos tipos de casillas de entrada de datos. El primer tipo se trata de una casilla en la que se puede escribir datos alfanuméricos. En el segundo tipo de casilla o bien se puede elegir un valor de una lista desplegable o bien escribir manualmente uno de los valores de la lista desplegable. En el caso de que se introduzca un valor que no pertenece a la lista, dará un aviso de que sólo se pueden escribir ciertos valores en esta celda.

En la figura posterior, Fig. 7.3, se observa que la casilla para entrar la altura del pilar H se puede elegir un valor de una lista desplegable. Los valores de $q_{adm,suc}$ y $F_{Horizontal}$ se han de escribir manualmente y casillas en verde calculan valores automáticos.

Longitudes:	
H (mm) =	<input type="text"/>
L (mm) =	<input type="text"/>
s (m) =	<input type="text"/>
f (mm) =	<input type="text"/>
Carga y Fuerza horizontal	<div> <div>3000</div> <div>3500</div> <div>4000</div> <div>4500</div> <div>5000</div> <div>5500</div> <div>6000</div> </div>
$q_{adm,suc}$ (daN/m²) =	<input type="text"/>
$q_{u,suc}$ (N/m²) = $q \cdot 1,5$ =	0,00
$F_{Horizontal}$ (daN) =	<input type="text"/>
$F_{u,Horizontal}$ (N) = $F_{Horizontal} \cdot 1,5$ =	0,00

Fig. 7.3 Diferentes tipos de casillas

Una vez introducidos los datos, la hoja de cálculo, mediante fórmulas, programación y relación con otras pestañas propone automáticamente un perfil recomendado con una K (rigidez) mayor a la necesaria K_{min} si es posible. (Ver Fig. 7.4)

Se puede realizar la comprobación de este perfil o si se prefiere, elegir otro de la lista desplegable y hacer la comprobación con éste último perfil elegido, tal y como se muestra en la Fig. 7.5. Debajo del perfil que se comprueba se ha puesto el valor de la $K_{perfil\ comprobación}$ que es el valor de la rigidez del perfil que se hace la comprobación.

Rigidez:	K_{min} =	250	Rigidez horizontal mínima necesaria de los soportes
Elección del perfil metálico:	Perfil Recomendado	Elegir otro Perfil si se desea	Perfil Comprobación
	HE 360 B		HE 360 B
		K perfil comprobacion =	251,942

Fig. 7.4 Perfil recomendado, K_{min} y $K_{perfil\ comprobación}$

Elección del perfil metálico:	Perfil Recomendado	Elegir otro Perfil si se desea	Perfil Comprobación
	HE 360 B	<div> <div>HE 320 B</div> <div>HE 340 B</div> <div>HE 360 B</div> <div>HE 400 B</div> <div>HE 450 B</div> <div>HE 500 B</div> <div>HE 550 B</div> <div>HE 600 B</div> </div>	HE 360 B
		K p	251,942

Fig. 7.5 Perfil recomendado, y lista desplegable para elegir otro perfil si se desea

El último dato que se nos presenta en la zona de datos es la clase de perfil a flexión. Ésta también se calcula automáticamente.

7.2.2 Otros datos

En la zona de Otros Datos (página 3 de la hoja) aparecen los datos del acero, como pueden ser: El módulo de elasticidad longitudinal o módulo de Young (E), El coeficiente de Poisson (ν), El módulo de elasticidad transversal (G), Coeficiente de seguridad de resistencia de las secciones transversales para estados límite últimos (γ_{M0}), Coeficiente de seguridad de resistencia de elementos estructurales frente a inestabilidad para estados límite últimos (γ_{M1}), Límite elástico del acero (f_y)

También aparecen los datos de la sección de los perfiles laminados a comprobar. Es decir, sus dimensiones y sus propiedades. Estos datos se rellenan automáticamente al escoger un perfil. Los datos los coge de la hoja o pestaña Datos Perfiles.

7.2.3 Comprobaciones a realizar

En la zona de comprobaciones a realizar (de la página 4 de la hoja de cálculo) se encuentran enumeradas las comparaciones que en posteriores páginas se llevara a cabo.

7.2.4 Cálculos

Los cálculos necesarios para realizar las comprobaciones se efectúan secuencialmente desde la página 5 a la 9.

7.2.5 Comprobaciones realizadas

Las comprobaciones realizadas se ejecutan en las páginas 10 y 11. Estas comprobaciones se realizan mediante los cálculos realizados en la zona de cálculos.

7.2.6 Resumen comprobación

El resumen comprobación (página 2 de la hoja) hace un resumen de todas las comprobaciones llevadas a cabo. Se sitúa este resumen en la página 2 para que una vez introducidos los datos necesarios no haga falta desplazarse hasta el final para ver los resultados de la comprobación.

7.3 PESTAÑA PRINCIPAL DE PRESIÓN

La pestaña u hoja de cálculo principal de PRESIÓN es bastante similar a la de SUCCIÓN. La de PRESIÓN tiene 17 páginas. En ellas están diferenciadas las mismas zonas que la de SUCCIÓN.

- Zona 1: Datos a rellenar (página 1)
- Zona 2: Resumen comprobación (página 2)
- Zona 3: Otros datos (página 3)
- Zona 4: Comprobaciones a realizar (página 4)
- Zona 5: Cálculos (desde la página 5 a la 15)
- Zona 6: Comprobaciones realizadas (páginas 16 y 17)

7.3.1 Datos a rellenar

Para la comprobación de los pilares que soportan la cubierta de chapa curva sometida a presión se tendrán que rellenar los siguientes datos:

- Tipo de perfil
- Elección del Acero
- Longitud o altura del soporte a comprobar, H
- Longitud del arco; Cuerda del arco que describe la chapa de acero conformada, L
- Flecha del arco que describe la chapa de acero conformada en frío, f
- Separación entre soportes, s
- Carga admisible de presión, $q_{adm, pres}$ (sin mayorar)
- Desplazamiento suma de los 2 soportes, $\delta_{soportes}$
- Rigidez horizontal mínima necesaria de los soportes (la misma que en succión), K_{min} (En presión no es necesaria para la comprobación, pero sí que lo es para que la hoja de cálculo presente automáticamente un soporte)
- Elegir otro perfil si se desea (opcional)

Las otras zonas: Otros datos, Comprobaciones a realizar, Cálculos, Comprobaciones realizadas y Resumen comprobación también son bastante similares.

7.4 PESTAÑAS RIGIDECES PILARES_SUCCIÓN, Y RIGIDECES PILARES_PRESIÓN

Ambas pestañas son similares. Estas pestañas son las encargadas de proporcionar un perfil automático que cumpla con la rigidez que se desea en el caso de succión.

Para las hipótesis de succión, en el modelo simulado del perfil curvado de chapa de acero se han considerado un enlace de rigidez K en cada extremo que simula la rigidez de la estructura

soporte. El cálculo de esta rigidez K se efectúa tal y como se explica en el subapartado 4.4 *RIGIDEZES DE LOS SOPORTES DE LA CUBIERTA (caso succión)* de esta memoria.

Las rigideces que se han estudiado en los apoyos se pueden conseguir fácilmente con perfiles laminados convencionales.

En estas pestañas se confeccionan una serie de tabla para cada tipo de perfil y para cada altura posible del pilar (en este proyecto se tomara el rango de alturas de $H=3\text{m}$ hasta $H=8\text{m}$ de $0,5\text{m}$ en $0,5\text{m}$). En total se han realizado 33 tablas. Ver las tablas en el **ANEJO B: hojas de cálculo**

A partir de la K_{\min} para succión, introducida inicialmente, se calculan todos los pilares que tienen una $K > K_{\min}$ y elegirá el perfil del tipo introducido (IPE, HEA o HEB) que cumpla con esta especificación y que se aproxime más a K_{\min} .

7.5 DATOS PERFILES

En esta pestaña se han introducido los datos dimensionales y propiedades físicas de todos los perfiles (IPE, HEA o HEB). Estos datos serán utilizados para realizar los cálculos del perfil a comprobar.

7.6 TABLAS EAE

En esta pestaña se han incluido las tablas de la *EAE Instrucción de acero estructural [5]* utilizadas para realizar las hojas de cálculo de la comprobación de soportes. Ver las tablas de la EAE utilizadas en el **ANEJO B: hojas de cálculo**.

7.7 LISTAS DESPLEGABLES

Dentro de la pestaña de listas desplegables se han puesto los datos para poder realizar las listas desplegables de introducción de datos de las pestañas principales SUCCIÓN y PRESION.

7.8 PÁGINAS DE LAS COMPROBACIONES

Como se ha comentado anteriormente la pestaña principal de SUCCIÓN contiene 11 páginas y la de PRESIÓN 17. A continuación se muestran las 3 primeras páginas de la comprobación de soportes a succión. Para ver la totalidad de las hojas de comprobación de soportes de succión y presión con todas las páginas completas ver **ANEJO B: hojas de cálculo**.

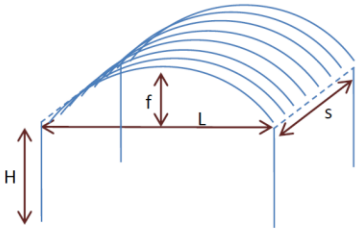
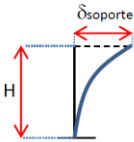
COMPROBACIÓN PILAR SUCCIÓN		PILAR CUBIERTA 1
Notas: Los perfiles utilizados en esta comprobación serán perfiles laminados con sección doble T y para aceros S235, S275, S355 y S420		
DATOS A RELLENAR:		
Elección del tipo de perfil metálico:		
Tipo de perfil:	IPE	
Elección del Acero:		
Acero:	S235	
		
Longitudes:		
H (mm) =	6.000	Altura o longitud del perfil Cuerda del arco de la chapa de acero conformada en frío Separación entre soportes Flecha de la chapa
L (mm) =	10.000	
s (m) =	5	
f (mm) =	1.800	
Carga y Fuerza horizontal:		
$q_{adm, suc} (daN/m^2) =$	373,00 =	3.730,00 N/m ²
Carga admisible de succión (sin mayorar)		
$q_{u, suc} (N/m^2) = q * 1,5 =$	5.595,00	
$F_{Horizontal} (daN) =$	1.819,00	
Fuerza horizontal		
$F_{u, Horizontal} (N) = F_{Horizontal} * 1,5 =$	27.285,00	
		
$\delta_{soporte} (mm) =$	22,25	Desplazamiento calculado con ANSYS de un soporte
Rigidez:		
$K_{min} =$	350	Rigidez horizontal mínima necesaria de los soportes
Elección del perfil metálico:		
	Perfil Recomendado	Elegir otro Perfil si se desea
	IPE 550	Perfil Comprobación
	IPE 550	IPE 550
Clase Perfil a Flexión:		
CLASE a momento flector_M	1	
$K \text{ perfil comprobacion} =$		391,533

Fig. 7.6 Hoja de cálculo de comprobación de soporte, SUCCIÓN (Página 1)

RESUMEN COMPROBACIÓN:

$N_{Ed} < N_{Rd}$	→	Si	ratio comprobación	0,0465	} → Ok
$M_{y,Ed} < M_{y,Rk}$	→	Si		0,2500	

Resistencia de las secciones: Comprobación a realizar en Secciones transversales de clase 1 y 2

$M_{y,Ed} < M_{N,y,Rd}$	→	Ok	ratio comprobación	0,2625
-------------------------	---	----	--------------------	--------

CUMPLE ✓

Resistencia de las secciones: Comprobación a realizar en Secciones transversales de clase 3

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \leq 1$$

→ La sección es de clase 1 o 2

Inestabilidad: Comprobación a realizar teniendo en cuenta el pandeo lateral

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0$$

→ 0,597

0,597 < 1
CUMPLE ✓

Desplazamiento

El desplazamiento máximo en las cabezas de los soportes debe ser menor o igual que la longitud dividida entre 250.

$$\delta_{max} \leq \frac{H}{250}$$

$$\delta_{soporte} =$$

22,25 < 24
CUMPLE ✓

Comprobación TOTAL (resistencia, estabilidad y desplazamiento)

CUMPLE ✓

Fig. 7.7 Hoja de cálculo de comprobación de soporte, SUCCIÓN (Página 2)

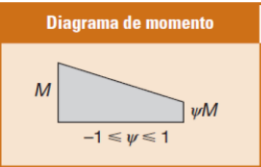
OTROS DATOS:		
Datos acero:		
$E \text{ (N/mm}^2\text{)} =$	210.000	
$\nu =$	0,3	
$G \text{ (N/mm}^2\text{)} =$	80.770	
$f_y \text{ (N/mm}^2\text{)} =$	235,00	
Datos prontuario: IPE 550		
$h \text{ (mm)} =$	550	
$b \text{ (mm)} =$	210	
$A \text{ (mm}^2\text{)} =$	13.440	
$t_w \text{ (mm)} =$	11,10	
$t_r \text{ (mm)} =$	17,20	
$d \text{ (mm)} =$	467,60	
$r \text{ (mm)} =$	24,00	
$W_{el,y} \text{ (mm}^3\text{)} =$	2.441.000	
$W_{pl,y} \text{ (mm}^3\text{)} =$	2.787.000	
$W_{pl,z} \text{ (mm}^3\text{)} =$	400.500	
$I_y \text{ (mm}^4\text{)} =$	671.200.000	
$I_z \text{ (mm}^4\text{)} =$	26.680.000	
$I_w \text{ (mm}^6\text{)} =$	1.884.000.000.000	
$I_t \text{ (mm}^4\text{)} =$	1.232.000	
$i_y \text{ (mm)} =$	223,50	
$i_z \text{ (mm)} =$	44,50	
$z_o =$	0,00	Distancia del centro de esfuerzos cortantes al centro de gravedad de la sección bruta a lo largo del eje z. Será 0 por tratarse de una sección simétrica
Coefficientes de Seguridad:		
$\gamma_{M0} =$	1,05	
$\gamma_{M1} =$	1,05	
Pandeo Lateral		
$\beta =$	2	Lo tratamos como un pilar empotrado abajo y libre en la parte superior
$h/b =$	2,62	
$t_r \text{ (mm)} =$	17,20	
$\alpha_{LT} =$	0,49	
Distribución de momentos:		
Diagrama de momento 		La comprobación se ha realizado para un diagrama de momentos lineal como muestra la figura.
		Para otros casos: Mirar tabla 5 y 6 de la pestaña de tablas EAE
Pandeo Lateral:	$K_c =$	0,75188
	$\Psi =$	0,00
		Mirar tabla 5 de la pestaña de tablas EAE

Fig. 7.8 Hoja de cálculo de comprobación de soporte, SUCCIÓN (Página 3)

8 EJEMPLO DE APLICACIÓN: CUBIERTA PISTA PÁDEL

Este apartado contiene un ejemplo de aplicación, utilizando las tablas realizadas y que se encuentran en el **ANEJO E: Tablas de capacidad de carga del perfil curvado H68** y verificando los soportes con la hoja de cálculo de comprobación de soportes que se explican y detalla en el **ANEJO B: Hojas de cálculo**.

El ejemplo de aplicación trata sobre la cubrición de una pista de pádel con un sistema constructivo de cubierta curvada autoportante de chapa de acero conformada en frío.

Como la explicación del ejemplo de aplicación es bastante extensa, en este apartado se incluye sólo un resumen. Para ver en detalle todo el proceso de verificación así como el cálculo de las cargas tenidas en cuenta ver el **ANEJO F: Ejemplo de aplicación CUBIERTA PISTA DE PÁDEL**

8.1 DESCRIPCIÓN DEL EJEMPLO DE APLICACIÓN

La empresa con nombre ficticio PADEL INGENIO S.A, en adelante PADELING, posee varias instalaciones de pistas de pádel repartidas por toda la geografía de Catalunya. Concretamente, en Barcelona posee unas instalaciones con 8 pistas de pádel que se pueden apreciar en la Fig. 8.1. De todas estas pistas desean cubrir la que está más al Este, utilizando un sistema constructivo de cubierta curvada autoportante de chapa conformada en frío.



Fig. 8.1 Vista aérea de las instalaciones de PADELING.

8.2 GEOMETRÍA DE UN CAMPO O PISTA DE PÁDEL

Además de otras normativas de proyectos de construcción e instalación, para los proyectos sobre pistas de pádel, se ha de tener en cuenta la *Normativa sobre instalaciones deportivas y para el esparcimiento (NIDE)* [3], elaborada por el Consejo Superior de Deportes, Organismo autónomo dependiente del Ministerio de Educación Cultura y Deporte. Esta normativa tiene como objetivo definir las condiciones reglamentarias, de planificación y de diseño que deben considerarse en el proyecto y la construcción de instalaciones deportivas.

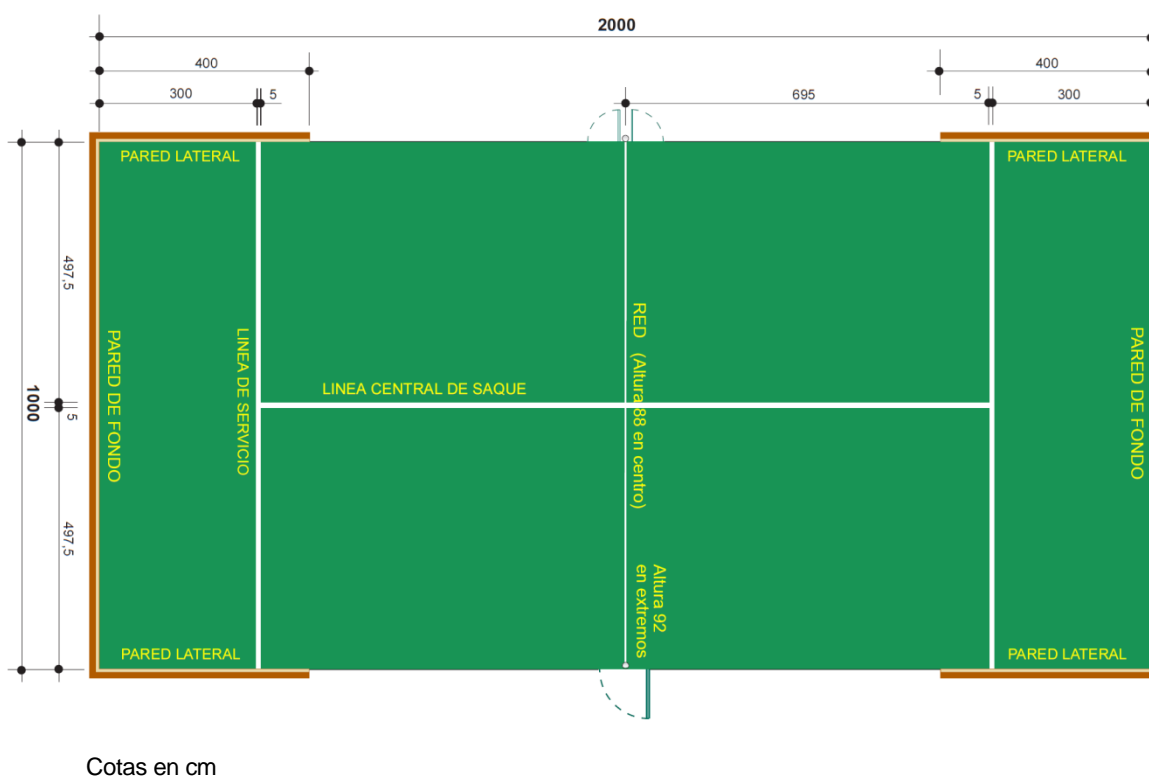


Fig. 8.2 Planta del campo o pista de juego.

La pista de juego es un rectángulo de dimensiones 20m x 10m de medidas interiores (Tolerancia $\pm 0,5\%$) cerrada en su totalidad con zonas de paramentos que ofrecen un rebote regular de la pelota y zonas de malla metálica donde el rebote es irregular (ver Fig. 8.2).

En sus fondos está cerrada por paredes o muros con una altura de 3m. Las paredes laterales son escalonadas y formadas por paños rectangulares de 3m de altura y 2m de longitud el primer paño y de 2m de altura y 2m de longitud el segundo paño. El resto de los lados se cierra con malla metálica que a su vez sube por encima de las paredes hasta 4m de altura en todo el perímetro, también se admite que la malla metálica en las paredes laterales tenga una altura de 4m en los dos primeros metros a contar desde el fondo de la pista y los 16m restantes una altura de 3m (ver Fig. 8.3, Fig. 8.4 y Fig. 8.5, con cotas en cm)

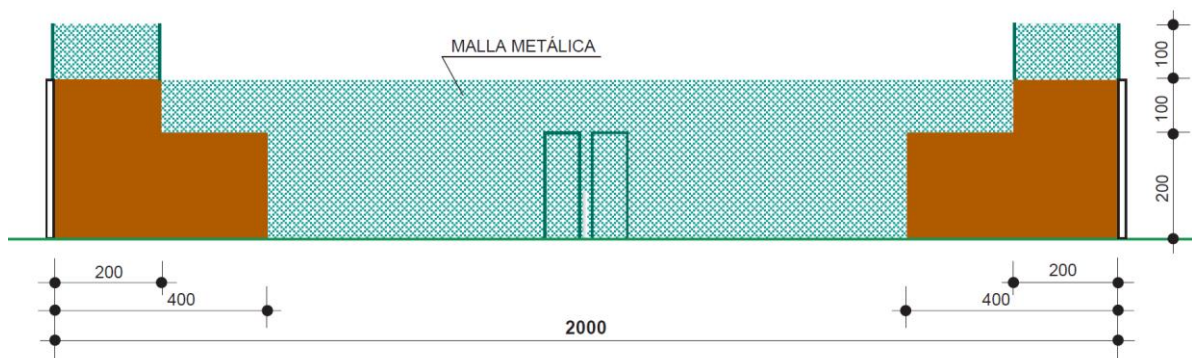


Fig. 8.3 Alzado lateral, pista de pádel (variante 1).

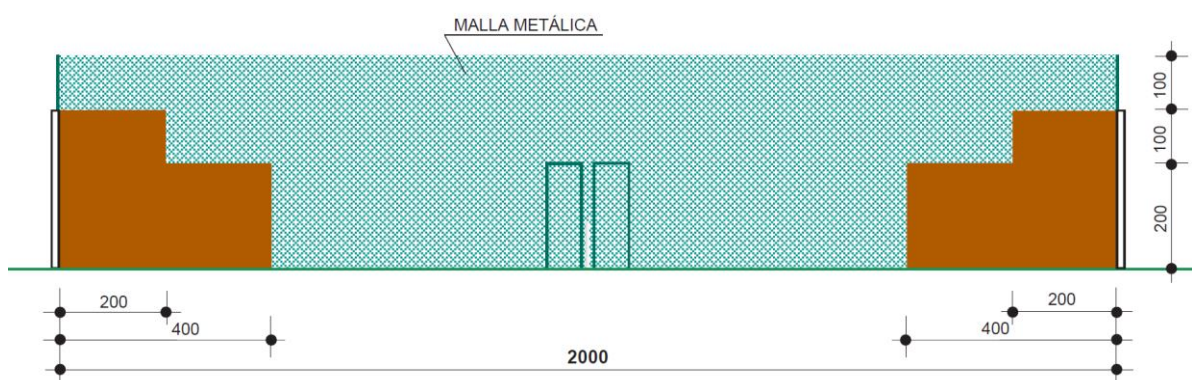


Fig. 8.4 Alzado lateral, pista de pádel (variante 2).

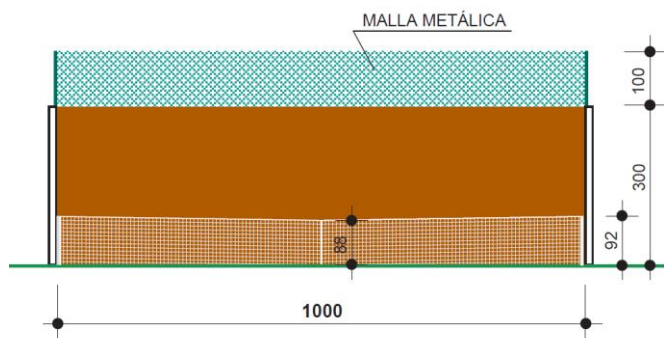


Fig. 8.5 Alzado fondo.

La altura libre entre el pavimento y el obstáculo más próximo (luminaria, techo en instalaciones cubiertas) será de 6m como mínimo sobre toda la superficie de la pista sin que exista ningún elemento que invada dicho espacio.

En pistas al aire libre se dispondrán los proyectores exteriormente a la pista, a una altura mínima desde el suelo de 6m.

Ninguna luminaria deberá colocarse en la zona del techo que está situada sobre la superficie de la pista para evitar deslumbramientos.

8.3 DATOS A TENER EN CUENTA PARA LA COLOCACIÓN DE LA CUBIERTA

Se trata de cubrir una de las pistas de pádel de las instalaciones de PADELING mencionadas. Esta pista es la que se encuentra más al Este y tiene los límites próximos a un muro perimetral en la parte de la derecha y en la parte posterior o fondo de la pista, tal y como se observa en la Fig. 8.6

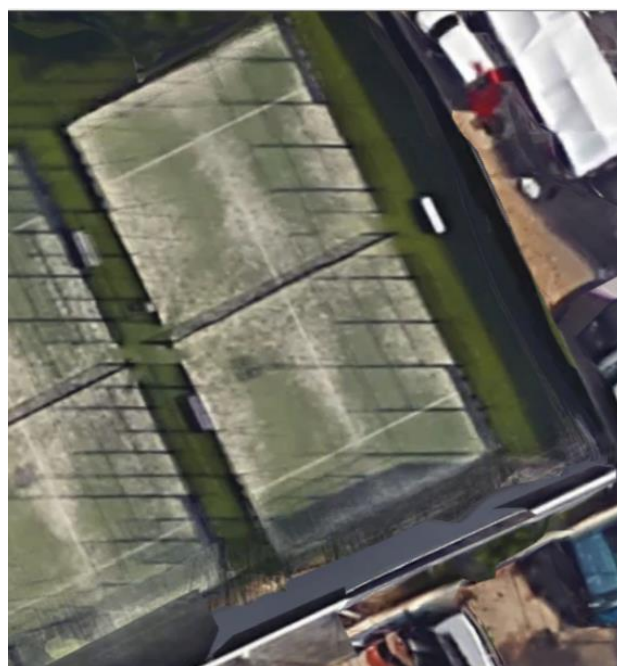


Fig. 8.6 Vista aérea de la pista a cubrir

Los datos principales dimensionales a tener en cuenta a la hora de proyectar una cubierta curvada autoportante de chapa de acero conformada en frío, para cubrir una pista de pádel son los siguientes:

- Longitud pista de pádel: 20 m
- Anchura pista de pádel: 10 m
- Distancia entre las 2 pistas: 2,5 m
- Distancia al muro perimetral: 4 m (a la derecha de la pista)
- Distancia al muro perimetral: 2 m (al fondo de la pista)
- Altura proyectores: 6 m (parte superior respecto al suelo)

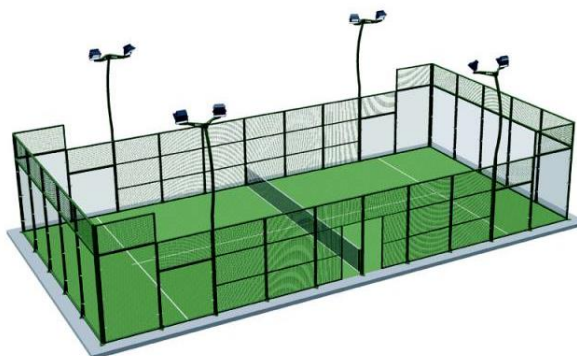


Fig. 8.7 Pista de pádel con iluminación artificial mediante proyectores.

8.4 CUBIERTAS A INSTALAR

Se colocará la cubierta sobre soportes metálicos que serán perfiles laminados. Como la parte superior de los proyectores de iluminación, se encuentran a una altura de 6 m respecto al suelo, la cubierta curva autoportante se colocará a una altura de 7 m.

La flecha del arco que describen las cubiertas que se están estudiando va desde 1 m a 3 m. Se elige una flecha intermedia (de 2 m). Entonces la altura total de la estructura a colocar será de 9 m.

Como la distancia entre las 2 pistas es de 2,5 m se colocarán los soportes de la alineación izquierda en la mitad, es decir a 1,25 m de cada pista.

Al ser la distancia al muro perimetral de la derecha de 4 m se dejará un pasillo longitudinal de 2,25 m sin cubrir, dejando cubierto 1,75 m desde el final de la pista hasta el final de la cubierta.

Si sumamos los 1,25 m de la izquierda de la pista, los 10 m de la pista y los 1,75 m de la derecha de la pista, tenemos que la longitud del arco que describe la cubierta será de 13 m.

En el sentido longitudinal de la pista se cubrirán los 20 m de longitud de la misma, más 0,5 m en la parte frontal y otros 0,5 m en la parte del fondo. Con lo que tenemos que la cubierta cubrirá un total de 21 m de longitud.

Se colocarán tirantes de cable 7x19 Acero inoxidable AISI316 $\phi 16$ mm con una sección metálica A_{cable} , de 111 mm^2 , un módulo elástico E_{cable} , de 100.000 N/mm^2 y una resistencia del tirante N_u de $12.240 \text{ kg} \approx 120.074 \text{ N} \approx 120 \text{ kN}$. Se colocarán en cada extremo de los tirantes unos tensores abiertos al 50%. Se instalarán 9 tirantes distanciados 2,33 m.

La Fig. 8.8 muestra el esquema de las dimensiones de la estructura de la cubierta autoportante curvada de chapa de acero conformada en frío para la pista de pádel a cubrir.

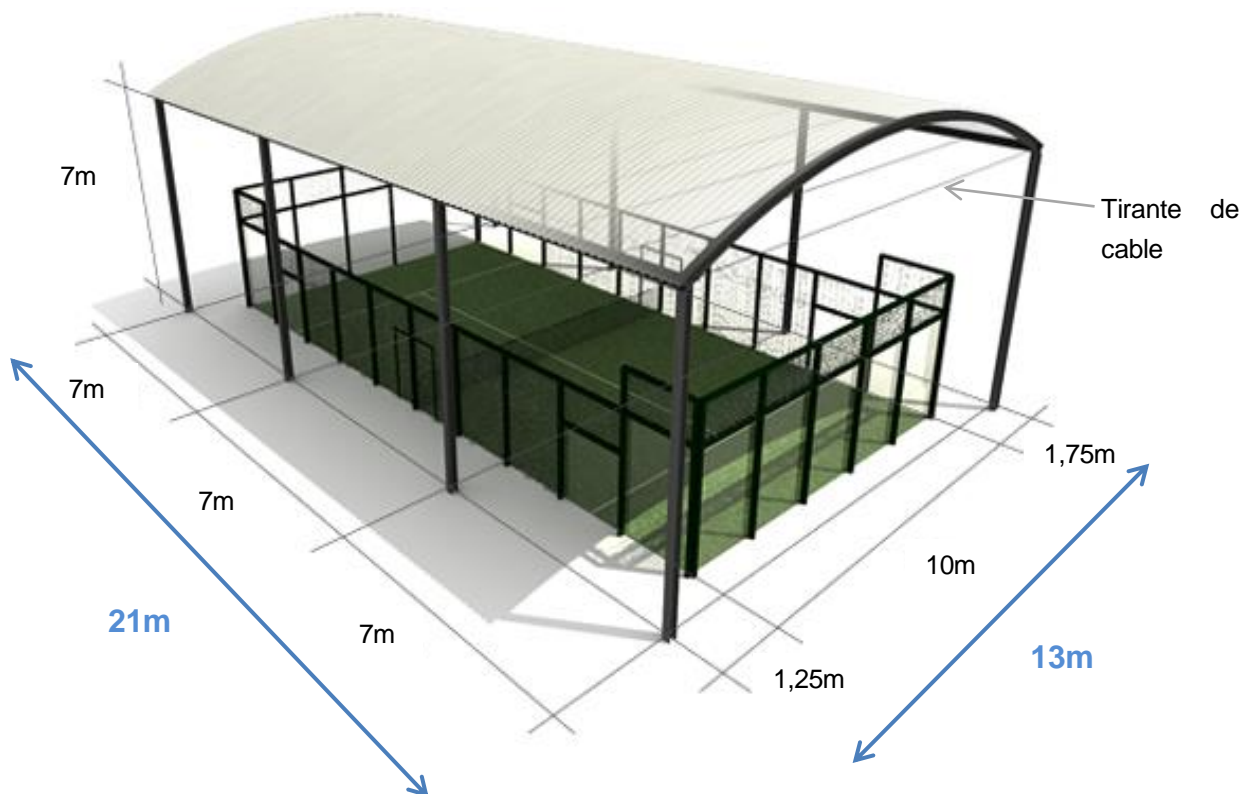


Fig. 8.8 Esquema de las dimensiones de la estructura de cubierta de la pista de pádel.

8.5 ACCIONES A CONSIDERAR

Las cargas a considerar en la cubierta autoportante curva de chapa de acero conformado en frío para cubrir una pista de pádel, con las características expuestas anteriormente, para la zona de Barcelona, según el *DB SE-AE* [4] para el peso propio, sobrecarga de uso, sobrecarga de nieve uniforme, viento frontal y viento lateral; y según el *Eurocódigo 1 Parte 1-3 Cargas de nieve* [6] para las sobrecargas de nieve con acumulación, se reflejan en la Tabla 8.1.

A efectos prácticos se considera la siguiente correspondencia entre las unidades de fuerza de los sistemas MKS y SI:

$$1 \text{ kilopondio } [1 \text{ kp}] = 10 \text{ Newton } [10 \text{ N}].$$

El cálculo detallado de las acciones a considerar se puede ver en **ANEJO F: Ejemplo de aplicación CUBIERTA PISTA DE PÁDEL.**

PISTA PADEL BARCELONA					
TIPO DE CARGA		Unidades MKS		Unidades SI	
Acciones PERMANENTES	Peso Propio chapa PP_{chapa}	13,50	kp/m^2 o daN/m^2	0,135	kN/m^2
	Peso Propio total PP_{total}	18,50	kp/m^2 o daN/m^2	0,185	kN/m^2
Acciones VARIABLES	Sobrecarga de uso SC_{uso}	40,00	kp/m^2 o daN/m^2	0,40	kN/m^2
	Sobrecarga de uso puntual $SC_{uso(puntual)}$	100,00	kp o daN	1,00	kN
	Viento uniforme (Frontal) $V_{uniforme}$	-80,00	kp/m^2 o daN/m^2	-0,80	kN/m^2
	Viento no uniforme (Lateral) $V_{lateral}$	VER TABLA Viento no uniforme (Lateral) $\rightarrow V_{lateral}$ $q_b = 0,52 \text{ kN/m}^2$ y $c_e = 1,71 \rightarrow V_{lateral} = q_b \cdot c_e \cdot c_p$ $V_{lateral} = Q_{viento lateral} \cdot c_p$			
		$88,92 \cdot c_p$	kp/m^2 o daN/m^2	$0,89 \cdot c_p$	kN/m^2
	Nieve uniforme $N_{uniforme}$	40,00	kp/m^2 o daN/m^2	0,40	kN/m^2
	Nieve con acumulación $N_{acumulación}$	VER TABLA Nieve con acumulación $\rightarrow N_{acumulación}$ $N_{acumulación} = \mu_i \cdot s_k$			
		$40 \cdot \mu_i$	kp/m^2 o daN/m^2	$0,4 \cdot \mu_i$	kN/m^2

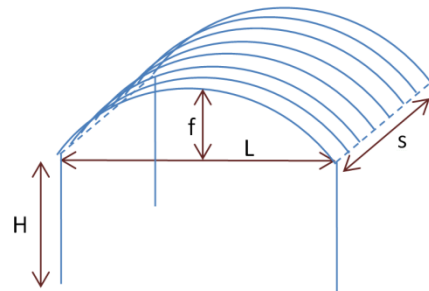
Tabla 8.1 Tabla Resumen de Acciones a considerar.

8.6 VERIFICACIÓN DE LA CUBIERTA

8.6.1 DATOS DE LA CUBIERTA

Se desea comprobar la utilización del perfil curvado H68, de espesor $t=1.2$ mm y acero S 280 G, en una cubierta con las características siguientes:

- Distancia entre apoyos $L=13.000$ mm
- Flecha del arco $f=2.000$ mm
- Separación entre perfiles $s=7.000$ mm
- Altura de apoyos $H=7.000$ mm
- Tirantes de cables de acero inox 7x19 cada 2,33 m



8.6.2 HIPÓTESIS DE CARGA

Las diferentes hipótesis se llevan a cabo aplicando la siguiente combinación de cargas:

$$\gamma_G \cdot q_G + \gamma_Q \cdot q_Q \quad (\text{Ec. 8.1})$$

Dónde,

- γ_G Es el coeficiente parcial de seguridad para las acciones permanentes.
- q_G Es una acción permanente. Se tiene en cuenta únicamente la acción del peso propio del perfil.
- γ_Q Es el coeficiente parcial de seguridad para las acciones variables.
- q_Q Es una acción variable.

Para el Estado Límite Último:

$$\gamma_G = 1,35$$

$$\gamma_Q = 1,50$$

Para el Estado Límite de Servicio:

$$\gamma_G = 1,00$$

$$\gamma_Q = 1,00$$

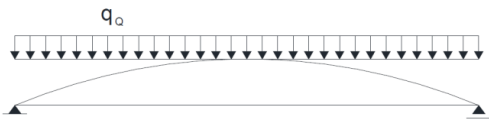

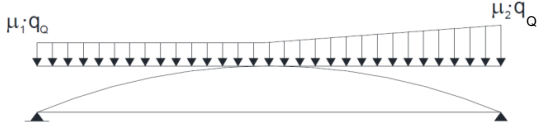
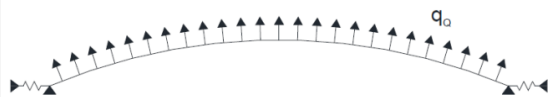
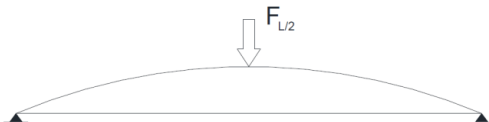
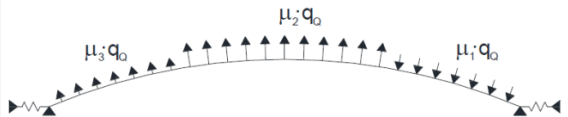
HIPÓTESIS CONSIDERADAS (Esquemas)	
<p>HIPÓTESIS 1 CARGA GRAVITATORIA UNIFORME</p> 	<p>HIPÓTESIS 4 CARGA PUNTUAL DESCENTRADA</p> 
<p>HIPÓTESIS 2 CARGA GRAVITATORIA NO UNIFORME</p> 	<p>HIPÓTESIS 5 CARGA SUCCIÓN UNIFORME (viento frontal)</p> 
<p>HIPÓTESIS 3 CARGA PUNTUAL CENTRADA</p> 	<p>HIPÓTESIS 6 CARGA SUCCIÓN NO UNIFORME (viento lateral)</p> 

Fig. 8.9 Hipótesis de carga 1, 2 y 3

Así pues, las hipótesis de carga son las mismas que las estudiadas para la realización de las tablas de capacidades. Para el Estado Límite Último, los valores de las cargas van

multiplicados por un coeficiente de seguridad que será de 1,35 para las acciones permanentes (que en nuestro caso será el peso propio) y 1,5 para las acciones variables (que en nuestro caso serán las sobrecargas de utilización, las sobrecargas de nieve y las sobrecargas de viento)

Por el contrario, para el Estado Límite de Servicio, todos los valores de las cargas van multiplicados por un coeficiente de seguridad que será de 1,00.

Las hipótesis para el Estado Límite Último consideradas, teniendo en cuenta la (Ec. 8.1) y según la Fig. 8.9, poniendo sus respectivos coeficientes de seguridad, son entonces:

- Hipótesis 1: gravitatoria uniforme, (caso de actuar la nieve uniformemente o sobrecarga de uso).

$$1,35 \cdot q_G + 1,5 \cdot q_Q$$

- Hipótesis 2: gravitatoria no uniforme (caso de actuar la nieve no uniformemente, es decir, con acumulación en uno de los 2 lados de la chapa).

$$1,35 \cdot q_G + 1,5 \cdot [\text{distribución } \mu_1, \mu_2] \cdot q_Q$$

- Hipótesis 3: carga puntual centrada (caso en el que una persona esté encima de la chapa realizando labores de mantenimiento y se sitúe en el centro del arco)

$$1,35 \cdot q_G + 1,5 \cdot F$$

- Hipótesis 4: de carga puntual descentrada (caso en el que una persona esté encima de la chapa realizando labores de mantenimiento y se sitúe a L/4 del arco)

$$1,35 \cdot q_G + 1,5 \cdot F$$

- Hipótesis 5: succión uniforme (caso en el que el viento actúe a succión uniforme)

$$1,35 \cdot q_G + 1,5 \cdot q_Q$$

- Hipótesis 6: viento no uniforme (viento lateral)

$$1,35 \cdot q_G + 1,5 \cdot [\text{distribución } \mu_1, \mu_2, \mu_3] \cdot q_Q$$

Dónde:

- q_G Es una acción permanente. Se tiene en cuenta únicamente la acción del peso propio del perfil.
- q_Q Es una carga distribuida variable.
- F Es una carga puntual variable.

En la Tabla 8.2 se resumen todas las cargas y sus coeficientes.

PISTA PADEL BARCELONA						
TIPO DE CARGA		Carga		Coeficiente de seguridad γ	Carga Mayorada	HIPÓTESIS a Comprobar
Acciones PERMANENTES	Peso Propio chapa PP_{chapa}	13,50	kp/m^2 o daN/m^2	1,35	18,23	-
	Peso Propio total PP_{total}	18,50	kp/m^2 o daN/m^2	1,35	24,98	-
Acciones VARIABLES	Sobrecarga de uso SC_{uso}	40,00	kp/m^2 o daN/m^2	1,50	60,00	Hipótesis 1
	Sobrecarga de uso puntual $SC_{uso(puntual)}$	100,00	kp o daN	1,50	150,00	Hipótesis 3 y Hipótesis 4
	Viento uniforme (Frontal) $V_{uniforme}$	-80,00	kp/m^2 o daN/m^2	1,50	-120,00	Hipótesis 5
	Viento no uniforme (Lateral) $V_{lateral}$	VER TABLA Viento no uniforme (Lateral) $\rightarrow V_{lateral}$ $q_b = 0,52 \text{ kN/m}^2$ y $c_e = 1,71 \rightarrow V_{lateral} = q_b \cdot c_e \cdot c_p$ $V_{lateral} = Q_{viento lateral} \cdot c_p$				
		$88,92 \cdot c_p$	kp/m^2 o daN/m^2	1,50	$133,38 \cdot c_p$	Hipótesis 6
	Nieve uniforme $N_{uniforme}$	40,00	kp/m^2 o daN/m^2	1,50	60,00	Hipótesis 1
	Nieve con acumulación $N_{acumulación}$	VER TABLA Nieve con acumulación $\rightarrow N_{acumulación}$ $N_{acumulación} = \mu_i \cdot S_k$				
		$40 \cdot \mu_i$	kp/m^2 o daN/m^2	1,5	$60 \cdot \mu_i$	Hipótesis 2

Tabla 8.2 Cargas e Hipótesis

8.6.3 VERIFICACIÓN DE LAS TABLAS CAPACIDAD DE CARGA PARA CADA HIPÓTESIS

La comprobación de las hipótesis de carga se reduce simplemente a la consulta de las tablas correspondientes, ya que están calculadas para $\gamma_Q=1.5$ y $\gamma_F=1.5$ y el acero S 280 G.

Asimismo, el peso propio del perfil H68 $t=1.2$ mm de $13,50$ kp/m² ya se encuentra incorporado en las tablas, con $\gamma_G=1.35$, y no es necesario añadirlo en las verificaciones.

Se proceden a verificar las tablas de capacidades realizadas en el **ANEJO E: Tablas de capacidades** para cada hipótesis de carga de la cubierta.

Para ello se hace una copia de las tablas de capacidad de cada hipótesis a verificar y se escoge valor $L=13000$ y $f=2000$

La rigidez horizontal mínima necesaria en los soportes, K , calculada según se explica en el **ANEJO A: Descripción del modelo y toma de decisiones** se elige igual 250.

$$K = 250.$$

En las hipótesis de succión, hipótesis 5 e hipótesis 6, para hacer la verificación de la cubierta mediante las tablas de capacidad, se han de elegir de todas las tablas, las realizadas para una rigidez de 250.

En las hipótesis de carga no uniforme, hipótesis 2 e hipótesis 6, los coeficientes de las cargas no se han de tener en cuenta al verificar con las tablas ya que éstos se encuentran incluidos en las hipótesis calculadas. Es decir:

- **Hipótesis 2 (Nieve acumulada)**

Los coeficientes de forma de la nieve, μ_i , ya están incluidos en las tablas así que no se tendrán que tener en cuenta. Para el caso de la cubierta de la pista de pádel que se está estudiando, la carga de la hipótesis 2 vale: $q_{NIEVE} = q_Q \cdot \mu_i = 40\mu_i$ daN/m², así que el valor que se ha de comparar con las tablas es $q_Q = 40$ daN/m²

- **Hipótesis 6 (Viento lateral)**

Los coeficientes de presión, c_p ya están incluidos en las tablas así que no se tendrán que tener en cuenta. Para el caso de la cubierta de la pista de pádel que se está estudiando, la carga de la hipótesis 6 vale: $q_{VIENTO} = q_Q \cdot c_p$ daN/m² = $88,92c_p$ daN/m². Así que el valor que se ha de comparar con las tablas es $q_Q = 88,92$ daN/m²

Para la hipótesis 6 (viento lateral), además de las especificaciones anteriores, se han de elegir de todas las tablas de la hipótesis 6, las relativas a las de marquesina (caso3a y caso 3b) realizadas para una rigidez de 250, para hacer la verificación.

Cuando se vaya a verificar los elementos de sujeción en los apoyos, los valores de reacción horizontal $F_{\text{Horizontal}}$ se deberán mayorar según las especificaciones del fabricante del sistema de elementos de sujeción utilizado.

HIPÓTESIS 1: CARGA GRAVITATORIA UNIFORME (PRESIÓN UNIFORME)

Éste es el caso de la sobrecarga de uso y de la sobrecarga de nieve uniforme. Da la casualidad que el valor de q_Q es el mismo para los casos de sobrecarga de uso y nieve. Así que sólo se comprobará una vez. $q_Q=40 \text{ daN/m}^2$ con $\gamma_Q=1.5$

CHAPA H68		CARGA GRAVITATORIA UNIFORME (P)											
		$q \text{ (daN/m}^2\text{) E.L.U. (ESTADO LÍMITE DE SERVICIO)}$											
Espesor=1.2 mm		$f \text{ (mm)}$											
L (mm)	9000	163	177	190	198	207	213	220	220	220	217	213	207
	9500	133	147	160	168	177	182	187	190	193	193	193	190
	10000	110	122	133	142	150	155	160	163	167	167	167	167
	10500	90	100	110	118	127	132	137	142	147	148	150	148
	11000	74	83	92	99	107	112	117	122	127	128	130	132
	11500	61	69	77	83	90	95	100	103	107	110	113	115
	12000	50	57	63	69	76	81	86	90	93	97	100	102
	12500	41	47	53	58	63	68	73	76	80	83	87	88
	13000	33	39	44	49	53	58	62	65	69	71	73	76
	13500	27	32	36	40	45	48	52	56	59	61	63	66
	14000	-	-	30	34	38	41	44	47	50	53	55	57

(*) Esta tabla solo tiene valor informativo. No debe utilizarse para el diseño. El diseño se realizaría comparando los resultados de esta tabla con la c Los coeficientes de seguridad ya se han contemplado internamente en los cálculos.

	VALORES MÁS BAJOS SI CONSIDERAMOS LIMITACIÓN POR FLECHA DE $L/150$ y $L/200$
	VALORES MÁS BAJOS SI CONSIDERAMOS LIMITACIÓN POR FLECHA DE $L/200$
	VALORES LIMITADOS POR RESISTENCIA DE LA CHAPA

Tabla 8.3 Carga gravitatoria uniforme $q_{Q\text{máx}}$ ELU

Por tanto, para el estado límite último, ELU, $q_{Q\text{máx}} = 73 \text{ daN/m}^2 > 40 \text{ daN/m}^2 \rightarrow \text{VERIFICA}$. Además se han de mirar los valores limitados por flecha de $L/200$ (estado límite de servicio).

CHAPA H68		CARGA GRAVITATORIA UNIFORME (P)											
		$q \text{ (daN/m}^2\text{) E.L.S. (ESTADO LÍMITE DE SERVICIO)}$											
Espesor=1.2 mm		$f \text{ (mm)}$											
L (mm)	9000	83	102	120	138	157	176	195	208	220	217	213	207
	9500	68	84	100	116	132	147	162	175	188	191	193	190
	10000	55	69	83	97	110	123	135	146	157	162	167	167
	10500	45	58	70	81	92	104	117	127	137	143	150	148
	11000	39	48	57	67	77	87	97	107	117	123	130	132
	11500	31	39	47	56	65	72	80	88	97	102	108	112
	12000	25	32	38	47	56	63	71	77	83	89	95	99
	12500	21	27	33	38	43	51	58	64	70	76	82	86
	13000	13	19	24	31	38	43	47	53	59	64	68	74
	13500	12	17	21	25	30	36	42	46	49	54	58	63
	14000	-	-	15	21	28	31	34	40	45	48	50	52

(*) Para realizar un dimensionamiento se compararán los resultados de esta tabla con la carga a soportar sin mayorar. Los coeficientes de seguridad ya se han contemplado internamente en los cálculos.

Tabla 8.4 Carga gravitatoria uniforme $q_{Q\text{máx}}$ ELS

Para ELS ($L/200$), $q_{Q\text{máx}} = 68 \text{ daN/m}^2 > 40 \text{ daN/m}^2 \rightarrow \text{VERIFICA}$.

HIPÓTESIS 2: CARGA GRAVITATORIA NO UNIFORME (PRESIÓN NO UNIFORME)

Sobrecarga de nieve con acumulación $q_{NIEVE} = q_Q \cdot \mu_i = 40\mu_i \text{ daN/m}^2$ con $\gamma_Q=1.5$

Tal y como se ha comentado anteriormente, se ha de comparar con $q_Q = 40 \text{ daN/m}^2$

CHAPA H68		CARGA GRAVITATORIA NO UNIFORME											
		$q \text{ (daN/m}^2\text{) E.L.U. (ESTADO LÍMITE DE SERVICIO)}$											
Espesor=1.2 mm		$f \text{ (mm)}$											
L (mm)		1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100
	9000	160	167	173	175	177	175	173	172	170	165	160	155
	9500	137	142	147	150	153	153	153	152	150	148	147	145
	10000	113	120	127	130	133	133	133	133	132	132	130	128
	10500	95	101	107	112	117	118	120	120	120	118	117	115
	11000	80	86	93	96	100	102	103	105	107	105	103	100
	11500	66	72	79	83	87	88	90	92	93	93	93	90
	12000	55	60	66	70	73	77	80	82	83	83	83	80
	12500	45	50	55	59	63	66	69	71	73	73	73	70
	13000	37	42	47	50	54	57	60	62	63	65	66	63
	13500	30	35	39	43	46	49	52	54	56	57	59	55
	14000	-	-	33	36	39	42	45	47	49	49	50	45

(*) Esta tabla solo tiene valor informativo. No debe utilizarse para el diseño. El diseño se realizaría comparando los resultados de esta tabla con los coeficientes de seguridad ya se han contemplado internamente en los cálculos.

	VALORES MÁS BAJOS SI CONSIDERAMOS LIMITACIÓN POR FLECHA DE $L/150$ y $L/200$
	VALORES MÁS BAJOS SI CONSIDERAMOS LIMITACIÓN POR FLECHA DE $L/200$
	VALORES LIMITADOS POR RESISTENCIA DE LA CHAPA

Tabla 8.5 Carga gravitatoria no uniforme $q_{Q\text{máx}}$ ELU

Por tanto, para ELU, $q_{Q\text{máx}} = 66 \text{ daN/m}^2 > 40 \text{ daN/m}^2 \rightarrow \text{VERIFICA.}$

Vemos que además se han de mirar los valores limitados por flecha de $L/200$

CHAPA H68		CARGA GRAVITATORIA NO UNIFORME (E.L.S.)											
		$q \text{ (daN/m}^2\text{) E.L.S. (ESTADO LÍMITE DE SERVICIO)}$											
Espesor=1.2 mm		$f \text{ (mm)}$											
L (mm)		1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100
	9000	90	104	118	130	142	148	153	157	160	158	155	154
	9500	77	87	97	107	118	123	128	132	135	136	137	133
	10000	63	73	82	90	98	103	108	113	118	119	120	118
	10500	50	58	67	74	82	88	95	98	100	101	102	103
	11000	40	49	58	64	70	74	78	83	87	88	88	88
	11500	31	40	49	55	62	66	70	72	73	76	78	78
	12000	25	33	41	45	48	54	60	62	63	66	68	68
	12500	20	25	30	37	43	46	49	51	53	56	58	58
	13000	17	22	27	30	34	37	40	44	48	50	51	51
	13500	15	17	19	25	31	34	37	39	41	42	44	44
	14000	-	-	18	21	24	27	30	32	34	34	35	37

(*) Para realizar un dimensionamiento se compararán los resultados de esta tabla con la carga a soportar sin mayorar. Los coeficientes de seguridad ya se han contemplado internamente en los cálculos.

Tabla 8.6 Carga gravitatoria uniforme $q_{Q\text{máx}}$ ELU

Para ELS ($L/200$), $q_{Q\text{máx}} = 51 \text{ daN/m}^2 > 40 \text{ daN/m}^2 \rightarrow \text{VERIFICA.}$

Para ver las verificaciones de todas las hipótesis ver el **ANEJO F: Ejemplo de aplicación CUBIERTA PISTA DE PÁDEL**. En él se pueden observar que todas las hipótesis verifican.

8.6.4 VERIFICACIÓN SOPORTES

Para realizar la verificación de los soportes de la cubierta a colocar se utilizará la hoja de cálculo automatizada, realizada en este proyecto para tal efecto. Se comprobarán los soportes primero actuando succión y luego presión.

Los datos que se precisan introducir en la zona de Datos a Rellenar, para la comprobación en el caso de succión son:

DATO A INTRODUCIR	VALOR
Nombre del pilar a comprobar	PADEL Barcelona
Tipo de perfil	HEB
Elección del Acero	S235
Altura del soporte a comprobar, H	7000 mm
Longitud del arco, L	13000 mm
Flecha del arco, f	2000mm
Separación entre soportes, s	7 m
Carga admisible de succión, $q_{adm\ suc}$ (sin mayorar)	273 daN/m ²
Fuerza horizontal, $F_{Horizontal}$	1981 daN/m
Desplazamiento soporte, $\delta_{soporte}$	25,35 mm
Rigidez horizontal mín. necesaria soportes, K_{min}	250

Tabla 8.7 Valores a introducir en comprobación soportes actuando succión.

Lo que determinará el tamaño del perfil en estos casos no será la carga, sino que será la K_{min} . Por eso para hacer la comprobación en vez de la carga real y la fuerza horizontal real se ha escogido la carga máxima que puede aguantar el perfil de chapa curvado $q_{adm\ suc}$ y su fuerza horizontal $F_{Horizontal}$ y el desplazamiento debido a la $q_{adm\ suc}$.

Los valores sombreados en rojo de los datos, se extraen de las tablas de capacidades de carga para la hipótesis 5 (succión uniforme). En la tabla siguiente se han marcado estos valores.

Hipótesis 5: Succión uniforme

CHAPA H68		K250 CARGA SUCCIÓN UNIFORM											
		q (daN/m ²) E.L.U. (ESTADO LÍMIT)											
Espesor=1.2 mm		f (mm)											
		1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100
L (mm)	9000	173	203	233	253	273	307	340	357	373	407	440	473
	9500	173	190	207	236	266	286	307	340	373	390	407	440
	10000	166	186	207	223	240	266	292	316	340	357	373	407
	10500	159	175	192	212	233	253	273	290	307	323	340	373
	11000	140	157	173	190	207	233	259	279	299	320	340	357
	11500	140	157	173	190	207	223	240	257	273	290	307	323
	12000	140	153	166	183	199	216	233	249	266	283	299	320
	12500	133	146	159	175	192	199	207	223	240	257	273	290
	13000	125	138	151	162	173	190	207	223	240	257	273	286
	13500	125	133	140	157	173	186	199	212	225	233	240	257
	14000	118	129	140	153	166	179	192	199	207	223	240	257
(*) Esta tabla solo tiene valor informativo. No debe utilizarse para el diseño. El diseño se realizaría comparando los resultados de esta tabla con la carga. Los coeficientes de seguridad ya se han contemplado internamente en los cálculos.													
		<div>VALORES MÁS BAJOS SI CONSIDERAMOS LIMITACIÓN POR FLECHA DE L/150 y L/200</div> <div>VALORES MÁS BAJOS SI CONSIDERAMOS LIMITACIÓN POR FLECHA DE L/200</div> <div>VALORES LIMITADOS POR RESISTENCIA DE LA CHAPA</div>											

CHAPA H68		K250 CARGA SUCCIÓN UNIFORM											
		Rh (daN/m) REACCIÓN HORIZONTAL E.L.U. (E)											
Espesor=1.2 mm		f (mm)											
		1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100
L (mm)	9000	1086	1178	1270	1292	1314	1372	1429	1408	1387	1408	1430	1435
	9500	1195	1228	1261	1342	1422	1437	1451	1502	1554	1528	1503	1521
	10000	1256	1319	1383	1405	1427	1481	1535	1561	1586	1570	1554	1587
	10500	1310	1360	1410	1464	1518	1553	1588	1591	1594	1588	1582	1631
	11000	1266	1330	1395	1440	1484	1566	1649	1678	1708	1724	1741	1730
	11500	1362	1433	1504	1555	1605	1640	1674	1694	1715	1725	1734	1734
	12000	1457	1506	1554	1614	1673	1715	1757	1785	1813	1829	1844	1868
	12500	1482	1539	1596	1665	1735	1718	1701	1742	1784	1811	1839	1856
	13000	1497	1564	1630	1662	1693	1757	1821	1868	1915	1948	1981	1980
	13500	1586	1601	1617	1710	1802	1842	1882	1909	1937	1914	1891	1926
	14000	1588	1650	1712	1776	1841	1888	1936	1924	1913	1967	2022	2062

CHAPA H68		K250 CARGA SUCCIÓN UNIFORM											
		Desplazamiento horizontal de un apoyo											
Espesor=1.2 mm		f (mm)											
		1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100
L (mm)	9000	12,02	13,77	15,53	16,52	17,52	18,97	20,42	22,13	23,84	24,68	25,52	26,90
	9500	11,41	12,98	14,55	16,08	17,61	19,01	20,41	22,10	23,79	24,50	25,21	26,78
	10000	11,81	13,03	14,25	15,72	17,19	18,84	20,49	21,87	23,24	24,22	25,21	26,95
	10500	12,08	13,27	14,46	16,24	18,02	19,38	20,75	21,68	22,62	23,70	24,79	26,49
	11000	12,11	13,51	14,92	15,87	16,82	18,41	20,00	20,90	21,79	23,24	24,70	26,43
	11500	12,73	13,21	13,69	15,88	18,07	19,60	21,13	21,85	22,58	24,12	25,67	26,59
	12000	11,08	12,44	13,81	15,24	16,68	18,55	20,42	21,39	22,36	24,38	26,39	26,83
	12500	10,58	12,45	14,33	15,70	17,07	18,87	20,68	20,96	21,24	23,20	25,17	26,12
	13000	10,58	12,38	14,17	15,96	17,76	18,78	19,80	21,70	23,59	24,47	25,35	26,17
	13500	10,67	12,92	15,18	15,57	15,95	18,11	20,28	21,15	22,02	23,61	25,20	26,63
	14000	10,45	13,04	15,64	15,72	15,81	18,49	21,18	21,91	22,65	23,95	25,24	25,83

Tabla 8.8 Valores de carga, reacción y desplazamiento de la hipótesis 5, para cubierta pista de Pádel.

En la Fig. 8.10 y Fig. 8.11 se muestran las 2 primeras hojas de la verificación de soportes, caso de actuar succión. Como se puede ver los soportes verifican las comprobaciones realizadas.

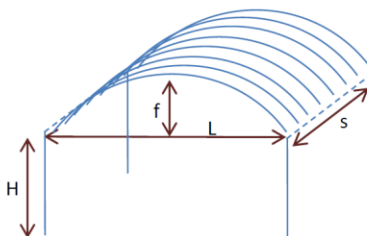
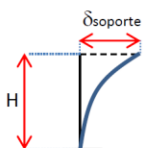
COMPROBACIÓN PILAR SUCCIÓN		PADEL Barcelona								
Notas: Los perfiles utilizados en esta comprobación serán perfiles laminados con sección doble T y para aceros S235, S275, S355 y S420										
DATOS A RELLENAR:										
Elección del tipo de perfil metálico:										
Tipo de perfil:	HEB	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> LEYENDA <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: #ffffcc; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> Rellenar con datos </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: #ccffcc; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> Resultados automáticos </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: #ffcc00; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> Comentarios </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: #cc00ff; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> Datos prontuario perfiles </div> </div>								
Elección del Acero:	S235									
										
Longitudes:										
H (mm) =	7.000	Altura o longitud del perfil Cuerda del arco de la chapa de acero conformada en frío Separación entre soportes Flecha de la chapa								
L (mm) =	13.000									
s (m) =	7									
f (mm) =	2.000									
Carga y Fuerza horizontal:										
$q_{adm, suc} (daN/m^2) =$	273,00 =	2.730,00 N/m ²	Carga admisible de succión (sin mayorar)							
$q_{u, suc} (N/m^2) = q * 1,5 =$	4.095,00	Fuerza horizontal								
$F_{Horizontal} (daN) =$	1.981,00									
$F_{u, Horizontal} (N) = F_{Horizontal} * 1,5 =$	29.715,00									
										
$\delta_{soporte} (mm) =$	25,35	Desplazamiento calculado con ANSYS de un soporte								
Rigidez: $K_{min} =$			250	Rigidez horizontal mínima necesaria de los soportes						
Elección del perfil metálico:			<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="background-color: #ffcc00; text-align: center; padding: 5px;">Perfil Recomendado</td> <td style="background-color: #ffcc00; text-align: center; padding: 5px;">Elegir otro Perfil si se desea</td> <td style="background-color: #ffcc00; text-align: center; padding: 5px;">Perfil Comprobación</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #ccffcc; text-align: center; padding: 5px;">HE 500 B</td> <td style="background-color: #ffffcc; text-align: center; padding: 5px;"></td> <td style="background-color: #ccffcc; text-align: center; padding: 5px;">HE 500 B</td> </tr> </table>		Perfil Recomendado	Elegir otro Perfil si se desea	Perfil Comprobación	HE 500 B		HE 500 B
Perfil Recomendado	Elegir otro Perfil si se desea	Perfil Comprobación								
HE 500 B		HE 500 B								
			$K_{perfil\ comprobacion} =$	281,283						
Clase Perfil a Flexión:										
CLASE a momento flector_M			1							

Fig. 8.10 hoja SUCCIÓN, comprobación soportes PADEL (página 1)

RESUMEN COMPROBACIÓN:

$N_{Ed} < N_{Rd}$	\longrightarrow	Si	ratio comprobación	0,0349	} \longrightarrow Ok
$M_{y,Ed} < M_{y,Rk}$	\longrightarrow	Si		0,1838	

Resistencia de las secciones: Comprobación a realizar en Secciones transversales de clase 1 y 2

$M_{y,Ed} < M_{N,y,Rd}$	\longrightarrow	Ok	ratio comprobación	0,1930
CUMPLE <input checked="" type="checkbox"/>				

Resistencia de las secciones: Comprobación a realizar en Secciones transversales de clase 3

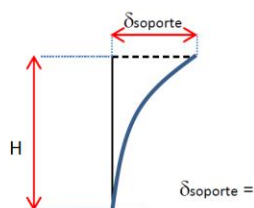
$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \leq 1$	\longrightarrow	La sección es de clase 1 o 2
--	-------------------	------------------------------

Inestabilidad: Comprobación a realizar teniendo en cuenta el pandeo lateral

$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0$	\longrightarrow	0,285
0,285 < 1 CUMPLE <input checked="" type="checkbox"/>		

Desplazamiento

El desplazamiento máximo en las cabezas de los soportes debe ser menor o igual que la longitud dividida entre 250.



$$\delta_{max} \leq \frac{H}{250}$$

$\delta_{soporte} =$	25,35 < 28
CUMPLE <input checked="" type="checkbox"/>	

Comprobación TOTAL (resistencia, estabilidad y desplazamiento)

CUMPLE ☒

Fig. 8.11 hoja SUCCIÓN, comprobación soportes PÁDEL (página 2)

Los datos que se precisan introducir en la zona de Datos a Rellenar, para la comprobación en el caso actuar presión son:

DATO A INTRODUCIR	VALOR
Nombre del pilar a comprobar	PADEL Barcelona
Tipo de perfil	HEB
Elección del Acero	S235
Altura del soporte a comprobar, H	7000 mm
Longitud del arco, L	13000 mm
Flecha del arco, f	2000mm
Separación entre soportes, s	7 m
Carga admisible de presión, $q_{adm\ pres}$ (sin mayorar)	73 daN/m ²
Desplazamiento suma de los 2 soportes, $\delta_{soportes}$	25,5 mm
Rigidez horizontal soportes succión, K_{min}	250

Tabla 8.9 Valores a introducir en comprobación soportes actuando presión.

Los valores sombreados en rojo de los datos, se extraen de las tablas de capacidad para la hipótesis 1 (presión uniforme). En la tabla siguiente se han marcado estos valores.

Se puede ver que los soportes verifican las comprobaciones realizadas.

Los perfiles laminados (en I) que cumplen con la rigidez necesaria en los soportes para el caso de succión son HEB-500.

Hipótesis 1: Presión uniforme

CHAPA H68		CARGA GRAVITATORIA UNIFORME (f)											
		q (daN/m ²) E.L.U. (ESTADO LÍMIT)											
Espesor=1.2 mm		f (mm)											
L (mm)		1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100
	9000	163	177	190	198	207	213	220	220	220	217	213	207
	9500	133	147	160	168	177	182	187	190	193	193	193	190
	10000	110	122	133	142	150	155	160	163	167	167	167	167
	10500	90	100	110	118	127	132	137	142	147	148	150	148
	11000	74	83	92	99	107	112	117	122	127	128	130	132
	11500	61	69	77	83	90	95	100	103	107	110	113	115
	12000	50	57	63	69	76	81	86	90	93	97	100	102
	12500	41	47	53	58	63	68	73	76	80	83	87	88
	13000	33	39	44	49	53	58	62	65	69	71	73	76
	13500	27	32	36	40	45	48	52	56	59	61	63	66
	14000	-	-	30	34	38	41	44	47	50	53	55	57

(*) Esta tabla solo tiene valor informativo. No debe utilizarse para el diseño. El diseño se realizaría comparando los resultados de esta tabla con la tabla 8.9. Los coeficientes de seguridad ya se han contemplado internamente en los cálculos.

	VALORES MÁS BAJOS SI CONSIDERAMOS LIMITACIÓN POR FLECHA DE L/150 Y L/200
	VALORES MÁS BAJOS SI CONSIDERAMOS LIMITACIÓN POR FLECHA DE L/200
	VALORES LIMITADOS POR RESISTENCIA DE LA CHAPA

CHAPA H68		CARGA GRAVITATORIA UNIFORME (f)											
		Desplazamiento horizontal total suma de ambos											
Espesor=1.2 mm		f (mm)											
L (mm)		1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100
	9000	19,87	21,40	22,92	23,97	25,03	25,89	26,8	26,6	26,5	24,7	22,9	21,2
	9500	19,80	21,39	22,98	24,08	25,18	25,84	26,5	26,8	27,0	25,9	24,7	23,2
	10000	19,36	21,14	22,92	23,97	25,03	25,65	26,3	26,4	26,6	25,9	25,2	24,0
	10500	19,18	21,05	22,93	23,82	24,72	25,71	26,7	27,0	27,3	26,9	26,6	25,0
	11000	19,98	21,13	22,27	23,34	24,41	25,21	26,0	26,6	27,3	27,1	26,9	25,9
	11500	19,24	20,50	21,75	22,98	24,22	24,75	25,3	25,8	26,4	26,3	26,1	25,7
	12000	18,96	20,14	21,32	22,86	24,40	25,17	25,9	26,2	26,4	26,5	26,5	26,2
	12500	19,07	20,29	21,51	22,08	22,65	23,74	24,8	25,3	25,8	26,0	26,3	26,1
	13000	16,68	18,15	19,62	21,46	23,30	23,50	23,7	24,4	25,2	25,3	25,5	25,9
	13500	17,76	19,10	20,45	21,05	21,65	23,11	24,6	24,5	24,3	24,7	25,1	25,6
	14000	-	-	18,66	20,98	23,31	23,39	23,5	24,5	25,5	25,2	24,9	24,5

Tabla 8.10 Valores de carga, y desplazamiento de la hipótesis 1, para cubierta pista de Pádel.

En la Fig. 8.12 y Fig. 8.13 se muestran las 2 primeras hojas de la verificación de soportes, caso de actuar presión. Como se puede observar, los soportes verifican las comprobaciones realizadas.

Los soportes cumplen tanto con las comprobaciones a succión como con las comprobaciones a presión. Por tanto estos perfiles HEB-500 verifican y pueden ser usados como soporte de las cubiertas para las pistas de Pádel.

Para ver todas las páginas de las verificaciones de los pilares ver el **ANEJO F: Ejemplo de aplicación CUBIERTA PISTA DE PÁDEL**

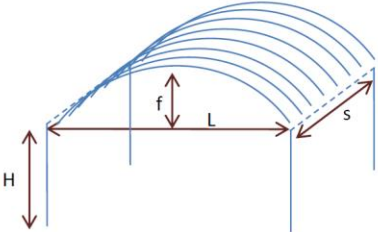
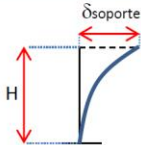
COMPROBACIÓN PILAR PRESIÓN		PADEL Barcelona
Notas: Los perfiles utilizados en esta comprobación serán perfiles laminados con sección doble T y para aceros S235, S275, S355 y S420		
DATOS A RELLENAR:		
Elección del tipo de perfil metálico:		
Tipo de perfil:	HEB	LEYENDA <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: yellow; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> Rellenar con datos </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: lightgreen; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> Resultados automáticos </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: orange; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> Comentarios </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: purple; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> Datos prontuario perfiles </div>
Elección del Acero:	S235	
		
Longitudes:		
H (mm) =	7.000,00	Altura o longitud del perfil
L (mm) =	13.000	Cuerda del arco de la chapa de acero conformada en frío
s (m) =	7	Separación entre soportes
f (mm) =	2.000	Flecha de la chapa
Carga y desplazamiento horizontal:		
$q_{adm, pres} (daN/m^2) =$	73,00	Carga admisible de presión (sin mayorar)
$q_u, pres (N/m^2) = q \cdot 1,5 =$	1.095,00	
		
$\delta_{TOTAL} (mm) =$	25,50	Desplazamiento calculado con ANSYS
$\delta_u (mm) = 1,5 \cdot \delta (mm) / 2 =$	19,13	
$\delta_{soporte} (mm) = \delta_{TOTAL} (mm) / 2 =$	12,75	
Rigidez:	$K_{min} = 250$	En este caso la Rigidez horizontal mínima de los soportes no es necesaria para la comprobación. Sólo es necesaria para calcular automáticamente un perfil.
Elección del perfil metálico:	Perfil Recomendado	Elegir otro Perfil si se desea
	HE 500 B	HE 500 B
Clase Perfil a compresión:	$K_{perfil comprobacion} = 281,283$	
CLASE a esfuerzo normal_N	1	
Clase Perfil a Flexión:	CLASE a momento flector_M	
	1	

Fig. 8.12 hoja PRESIÓN, comprobación soportes PÁDEL (página 1)

RESUMEN COMPROBACIÓN:

$N_{Ed} < N_{cry}$	→	Si	Ratio comprobación	0,00440	} → Ok
$N_{Ed} < N_{crz}$	→	Si		0,03733	
$N_{Ed} < N_{crT}$	→	Si		0,00491	
$M_{y,Ed} < M_{y,Rk}$	→	Si		0,26165	

Resistencia de las secciones: Comprobación a realizar en Secciones transversales de clase 1 y 2

$M_{y,Ed} < M_{N,y,Rd}$	→	Ok	Ratio comprobación	0,2747	→ CUMPLE ✓
-------------------------	---	----	--------------------	--------	-------------------

Resistencia de las secciones: Comprobación a realizar en Secciones transversales de clase 3

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \leq 1 \quad \longrightarrow \quad \text{La sección es de clase 1 o 2}$$

Resumen Comprobación:

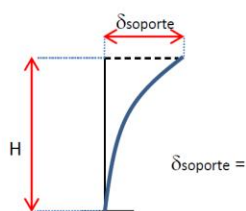
Inestabilidad: Comprobación a realizar teniendo en cuenta el pandeo lateral

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} + \frac{C_{my}}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad \longrightarrow \quad 0,3920$$

0,39 < 1
CUMPLE ✓

Desplazamiento

El desplazamiento máximo en las cabezas de los soportes debe ser menor o igual que la longitud dividida entre 250.



$$\delta_{max} \leq \frac{H}{250}$$

$\delta_{soporte} =$ 12,75 < 28
CUMPLE ✓

Comprobación TOTAL (resistencia, estabilidad y desplazamiento)

CUMPLE ✓

Fig. 8.13 hoja PRESIÓN, comprobación soportes PÁDEL (página 2)

9 IMPACTO AMBIENTAL

La evaluación del impacto ambiental de un proyecto es una práctica habitual en los países más desarrollados, ya sea por imperativo legal o por simple auto exigencia del promotor y/o como instrumento de diseño para mejorar la calidad y la viabilidad de un determinado proyecto. En efecto, es tan importante que el objeto proyectado funcione correctamente como el hecho, que a consecuencia de este funcionamiento se produzcan impactos negativos intolerables o demasiado elevados.

Este proyecto no presenta evidentes ventajas medioambientales respecto otras alternativas de estudio parecidas. En él se ha utilizado un programa informático de simulación y como todos los programas de simulación es una herramienta que permite ahorrar, aparte de tiempo y esfuerzo, material. El material ahorrado va más allá del papel que se pueda ahorrar ya que permite una reducción de los estudios experimentales.

Se pueden hacer numerosas simulaciones sin tener que realizar estudios experimentales iniciales. Cuando ya se tenga afinado el modelo con los resultados que se desean para él mediante la realización de las simulaciones, se pueden verificar los resultados de estas simulaciones con los ensayos experimentales. Reduciéndose así los ensayos experimentales notablemente.

El objeto de estudio de este proyecto son las cubiertas autoportantes de chapa de acero conformada en frío. Por tanto el material principal será el acero. A continuación se pasa a explicar el reciclaje del acero y los beneficios medioambientales que se obtienen con ello.

Reciclaje de acero

El acero es un material infinitamente reciclable. Gracias a sus características, el acero puede ser permanentemente reciclado sin merma de sus propiedades. Se recicla una y otra vez, sin que su calidad se deteriore. De esta forma, al final de la vida útil de cualquier producto hecho de acero, éste puede volver a fundirse, transformándose en un nuevo acero sin perder las características originales, alargando su ciclo de vida.

La utilización de chatarra para producir acero preserva recursos naturales, ahorra energía y agua y reduce las emisiones de CO₂ en su fundición. Además, gracias a sus propiedades magnéticas, este material es fácilmente separable de otros desechos, lo que permite su fácil recuperación, especialmente útil en el tratamiento de los residuos sólidos urbanos, evitando que vaya a vertederos. Gracias a su reciclabilidad vuelve al proceso siderúrgico como materia prima, tanto a través del proceso integral, como por la vía de horno eléctrico, donde se convierte en la materia prima más importante.

En la siguiente figura, Fig. 9.1, vemos el ciclo de vida de un producto de acero. Podemos observar que entre la fabricación de piezas o perfiles de metal, utilización y su posterior reciclaje se consumen materias primas y energía y se producen emisiones. Aunque si se utiliza acero reciclado, con cada tonelada de este acero reciclado (materia prima):

- Se evita la emisión de 1,5 toneladas de CO₂
- Se ahorra 1,4 toneladas de mineral de fe (hierro)
- Se ahorra 13 GJ de energía y sus consecuentes emisiones.

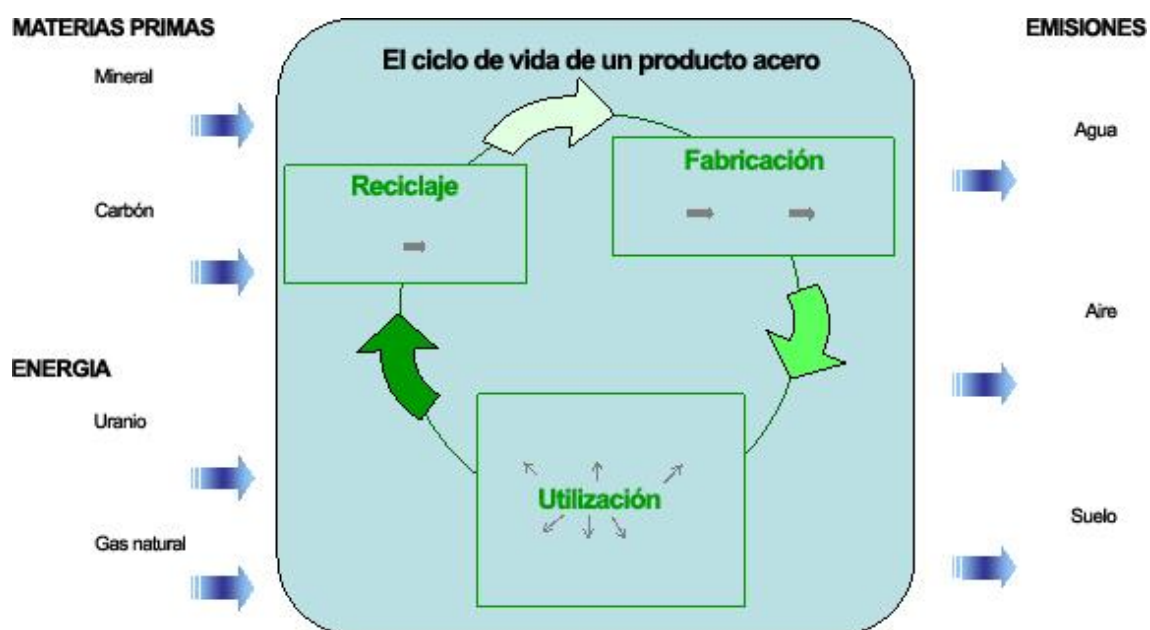


Fig. 9.1 Ciclo de vida de un producto de acero

En la siguiente figura, Fig. 9.2, se muestra el ciclo de vida del acero especificando los dos tipos de horno que hay para obtener el acero. Vemos que existen los altos hornos y los hornos eléctricos. Si se quiere obtener acero del mineral de hierro solo se puede hacer mediante los altos hornos. En cambio el acero que proviene del reciclaje se puede volver a utilizar por medio de hornos eléctricos que consumen mucha menos energía.

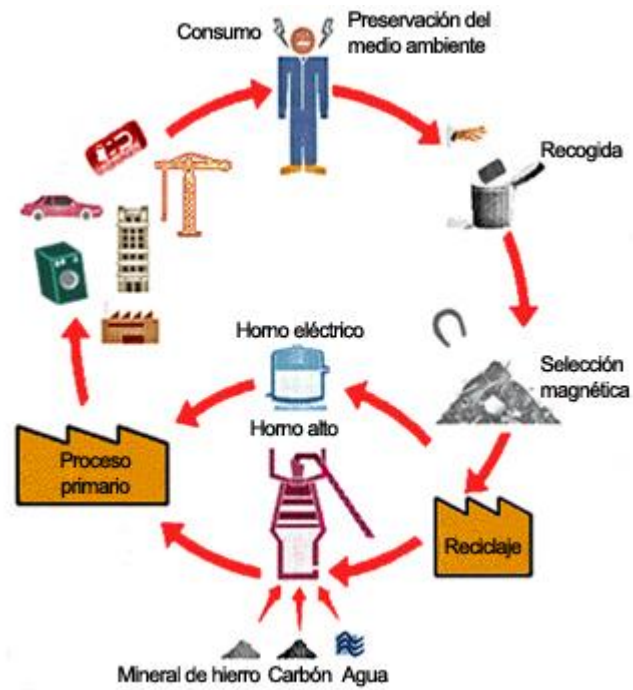


Fig. 9.2 Ciclo de vida del acero

10 PRESUPUESTO

La realización de este proyecto ha tenido una duración de 1 año. A la hora de realizar el presupuesto de su valoración se ha de tener en cuenta básicamente las horas invertidas en él, el material empleado y las licencias de los programas utilizados. Los costes generados por la mano de obra, se diferencian entre las horas dedicadas del director de proyecto y las de la estudiante autora de este proyecto. Los costes generados por el material utilizado incluyen el hardware, el software, el mobiliario y el material fungible.

A continuación se desglosan las diferentes partidas del proyecto:

COSTE DE LA MANO DE OBRA					
PERSONAL	Días trabajados	Horas/día	Total horas	€/ hora	Coste (€)
Director del proyecto	230	0,5	115	75,00	8.625,00
Estudiante de ingeniería industrial	230	8	1840	30,00	55.200,00
Subtotal					63.825,00

COSTE DEL MATERIAL						
CONCEPTO		Vida útil (años)	Coste (€)	Tiempo (años)	Coste anual amortizado (€)	Coste (€)
Hardware		5	1.000,00	1	200,00	200,00
Software	Ansys 14.0	5	6.000,00	1	1.200,00	1.200,00
	Microsoft Office 2010	5	600,00	1	120,00	120,00
	Autocad 2014	5	6.000,00	1	1.200,00	1.200,00
Mobiliario		6	300,00	1	50,00	50,00
Material fungible	Material de oficina	1	200,00	1	200,00	200,00
	Electricidad	1	150,00	1	150,00	150,00
Subtotal						3.120,00

TOTAL PRESUPUESTO	
CONCEPTO	Coste (€)
Mano de obra	63.825,00
Material	3.120,00
Subtotal	66.945,00
I.V.A (21%)	14.058,45
TOTAL	81.003,45

Tabla 10.1 Presupuesto el proyecto

CONCLUSIONES

El Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria, de la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (UPC) desde el año 2004 está estudiando e investigando sobre diferentes temas relacionados con las cubiertas autoportantes curvadas. Actualmente trabaja con dos empresas diferentes dentro del mismo ámbito.

Con este proyecto se ha colaborado con el Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria, de la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (UPC) ayudando en su trabajo de estudio e investigación.

La contribución de ese proyecto dentro del estudio de las cubiertas curvadas autoportantes de chapa de acero conformada en frío, se detalla a continuación según los diferentes aspectos estudiados.

Cable

Se ha profundizado sobre el tema de los cables metálicos eligiendo el cable más idóneo para usarlo en la cubierta. Este cable formará parte de los tirantes de cable (también estudiados) a colocar en la cubierta para contribuir a la resistencia del arco en los casos de presión.

Hipótesis de carga

Se han estudiado y establecido las hipótesis a considerar en este tipo de cubiertas. Además se han estudiado las diferentes situaciones y permutaciones en el caso que actúe viento lateral. También se han estudiado dos combinaciones de viento y nieve.

Como conclusión al estudio del viento actuando lateralmente, se ha determinado reducir las combinaciones a las más desfavorables de cada tipo de edificio donde la cubierta se puede situar (Edificio cerrado, Edificio con grandes huecos y Marquesina)

Como conclusión a las dos combinaciones de hipótesis (de viento y nieve) estudiadas, se determina se pueden sustituir estas combinaciones por el estudio por separado de la hipótesis combinadas.

Macros ANSYS

Se han afinado y modificado los procesos de cálculo de las Macros de ANSYS con las que se realizan las simulaciones de la cubierta. Éstas se han ajustado también a cada una de las hipótesis estudiadas.

Tablas de capacidades de carga

Se ha establecido una metodología pautada para la generación de las tablas de capacidades de carga. Y se han generado éstas para los casos estudiados.

A la hora de obtener los datos de las tablas mediante las simulaciones de ANSYS, por mucho que se han afinado los cálculos iterativos para ciertos casos concretos, hay un cambio brusco de comportamiento y no se obtienen resultados. Esto es debido a que la metodología no converge en ellos. Estos ciertos casos que son mínimos tienen gran longitud y baja flecha y no se han tenido en cuenta en las tablas.

Por regla general se observa en todas las tablas generadas, como cabía esperar, que cuanto mayor es la longitud del arco que describe la cubierta y menor su flecha, el comportamiento de la cubierta es peor.

Muchas de las combinaciones estudiadas no se pueden utilizar, dado que no son capaces de aguantar un mínimo de $40 \text{ daN/m}^2 \approx 40 \text{ kp/m}^2$

Comprobación de soportes

Se han establecido unas pautas y una metodología para la comprobación de los soportes de la cubierta. De forma que se ha automatizado la verificación de los soportes según normativa, mediante unas hojas de cálculo realizadas para tal fin.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera agradecer a mi director de proyecto, Miquel Casafont, su tiempo, dedicación y sus pacientes explicaciones para resolver mis dudas en todo momento. Sin su inestimable ayuda, este proyecto no hubiera podido acabarse con éxito.

Quiero agradecer también a Pedro Casariego por su soporte e interés a lo largo de la realización de este proyecto.

A Frederic Marimon, mi primer profesor de estructuras, que me supo despertar el interés por éstas y que por ello elegí hacer el proyecto dentro de éste área.

A todos los profesores de la ETSEIB por todos los conocimientos que me han brindado y con ellos ayudarme a afrontar cualquier tipo de problema y en especial a los profesores del Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria de la ETSEIB por todos los conocimientos que han sido capaces de transmitirme sin los cuales tampoco hubiera sido posible este proyecto.

Finalmente, quisiera agradecer en especial a mis padres porque sin ambos no sería quien soy. A mi madre Aurora, por ser siempre tan generosa y alegre, y aunque desde hace tiempo sé que nunca volveré a escuchar su voz, siempre tengo presente su risa, a mi padre Luis, por ser tan sabio en todos los aspectos de la vida y siempre tener un buen consejo que ofrecerme y animarme en todo momento a que finalizara el proyecto.

A mi hermana Erika porque desde que nació siempre hemos compartido todo y porque siempre que la necesito ésta ahí, apoyándome y ayudándome, siempre con buenas ideas y palabras alentadoras.

Y en general a toda la familia, y amigos quienes tanto me han ayudado a lo largo de la carrera y con quienes cualquier pretexto es bueno para celebrar alguna cosa.

Y por último, y muy especialmente a Jordi, por estar siempre a mi lado y por ayudarme en todo momento a subir esta escalera sin barandilla que es la vida, estirando de mí y cuidando que no caiga al vacío, cuando los escalones de la vida son tan altos, que mis piernas no alcanzan a subirlos por sí solas. Por no importarle que la carrera y este proyecto nos robara tantas horas. Por tantas cosas compartidas que espero que sean muchas más.

Jordi, ich liebe dich.

BIBLIOGRAFÍA

Referencias bibliográficas

- [1] ARGÜELLES ÁLVAREZ, R Y OTROS . *Estructuras de Acero*. Bellisco ediciones técnicas y científicas, Madrid 2007
- [2] CASAFONT RIBERA, M. Y MARIMON CARVAJAL, F. *Informe sobre la determinación de la capacidad de carga de los perfiles curvados h30, h40 y h55 fabricados por la empresa metalperfil, S.A.* Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, UPC. Barcelona 2006.
- [3] CONSEJO SUPERIOR DE DEPORTES, MINISTERIO DE EDUCACIÓN CULTURA Y DEPORTE, *NIDE Normativa sobre instalaciones deportivas y para el esparcimiento* Febrero 2015
- [4] *CTE Código Técnico de la Edificación, Parte DB-AE (Documento Básico – Acciones en la Edificación)*. Ministerio de Fomento, Gobierno de España, Abril 2009.
- [5] *EAE Instrucción de Acero Estructural con comentarios de los miembros de la comisión permanente de Estructuras de Acero*. Ministerio de Fomento, Gobierno de España, 3ª edición Noviembre 2012. Centro de publicaciones Secretaría General Técnica.
- [6] *EN 1991-1-3:2003 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-3: General actions - Snow loads*. CEN European Committee for Standardisation, Brussels, 2003
- [7] *EN 1993-1-1:2005 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1 General rules and rules for buildings* CEN European Committee for Standardisation, Brussels, 2005
- [8] *EN 1993-1-3:2006 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting*. CEN European Committee for Standardisation, Brussels, 2006
- [9] *EN 1993-1-5:2006 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-5: General rules - Plated structural elements*. CEN European Committee for Standardisation, Brussels, 2006
- [10] PEDRO CASARIEGO VALES. *Estudio de arcos estructurales obtenidos por embutición a partir de paneles nervados conformados en frío (Tesis Doctoral)*. Barcelona 2014

Bibliografía complementaria

- [11] ACELORMITTAL Gama de productos HE Perfiles H de alas anchas [http://sections.nvision.lu/fileadmin/redaction/2-Products_Services/1_Product_Range/ES-EN-IT/HE.pdf]
- [12] ACELORMITTAL Gama de productos IPE Perfiles I de alas paralelas [http://sections.arcelormittal.com/fileadmin/redaction/2-Products_Services/1_Product_Range/ES-EN-IT/IPE.pdf]
- [13] AENOR: *Dibujo técnico. Normas básicas*. 1999.
- [14] ANSYS *Tutorials* - University of Alberta <http://www.mece.ualberta.ca/tutorials/ansys/>
- [15] *Ansys.net a resource for Ansys users* <http://ansys.net/?mycat=home>
- [16] ANSYS; *Mechanical APDL Documentation*, Release 14.0
- [17] ANSYS; *Structural Analysis Guide*, Release 14.0
- [18] CALLISTER, WILLIAM D., *Ciencia e Ingeniería de Materiales*, Editorial Reverté, S.A., Edición: 2003.
- [19] CTE *Código Técnico de la Edificación, Parte DB-SE (Documento Básico – Seguridad Estructural)*. Ministerio de Fomento, Gobierno de España, Abril 2009.
- [20] EN 1991-1-4:2005 *Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions*. CEN European Committee for Standardisation, Brussels, 2005
- [21] EN 1991-2:2003. *Eurocode 1. Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges*.
- [22] EN 1993-2:2006 *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 2: Steel Bridges*. CEN European Committee for Standardisation, Brussels, 2006.
- [23] UNE-EN 10025-1:2006. *Productos laminados en caliente de aceros para estructuras. Parte 1: Condiciones técnicas generales de suministro*.

Cables

- [24] *Cables del mediterráneo* <http://www.cablesmed.com/>
- [25] *Cables estructurales* <http://www.cablesestructurales.com/cables/>
- [26] *Cables y cordones de acero Inoxidable*, Cables Estructurales, catálogo
- [27] *Cables y eslingas* <http://www.cyesa.com/es/zonapublica/index.aspx>
- [28] *Macalloy* <http://www.macalloy.com/>
- [29] *PFEIFER Cables y Equipos de Elevación* <http://www.pfeifer.es/>
- [30] *Tirantes de cables de acero Inoxidable*, Cables Estructurales, catálogo
- [31] *Wire Rope User's Handbook*, Union, 2014